



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
ENGENHARIA CIVIL

HELMANO DAVID GALVÃO FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE O CUSTO DE TERRAPLENAGEM E A
SELEÇÃO ÓTIMA DOS EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS ATRAVÉS DE UM
MODELO DE REDES DE PETRI COLORIDAS**

FORTALEZA

2016

HELMANO DAVID GALVÃO FERNANDES

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE O CUSTO DE TERRAPLENAGEM E A SELEÇÃO
ÓTIMA DOS EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS ATRAVÉS DE UM MODELO DE
REDES DE PETRI COLORIDAS

Monografia referente ao término do curso de
Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará – UFC para a
obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- F399a Fernandes, Helmano David Galvão.
Avaliação da relação entre o custo de terraplenagem e a seleção ótima dos equipamentos envolvidos através de um modelo de redes de petri coloridas / Helmano David Galvão Fernandes.– 2015.
85 f.: il., color.
- Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2015.
Orientação: Prof. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.
1. Terraplenagem. 2. Modelagem. 3. Petri, Redes de. I. Título.

HELMANO DAVID GALVÃO FERNANDES

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE O CUSTO DE TERRAPLENAGEM E A SELEÇÃO
ÓTIMA DOS EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS ATRAVÉS DE UM MODELO DE
REDES DE PETRI COLORIDAS

Monografia referente ao término do curso de
Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará – UFC para a
obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em: 15 / 02 / 16

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Orientador)

Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso

Universidade Federal do Ceará - UFC

A Deus que é criador, redentor e mantenedor.
Por me ter mantido firme nessa caminhada e por
me ter concedido forças para nunca desistir. Ao
Senhor devo tudo pois sem Ele nada sou, mas.
Nele posso tudo, pois me fortalece, me ajuda,
me sustenta com a destra da sua justiça, me
toma pela mão direita e me diz: Não temas eu
te ajudo.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai Celeste, minha fortaleza e rocha minha.

À minha família por ter apostado na minha educação e nunca ter hesitado em investir nela. Agradeço ao meu Pai, à minha mãe e aos meus irmãos por serem uma inspiração para mim e por me terem proporcionado momentos de alegria em minha vida. Amo-vos!

Ao professor Ernesto Ferreira Nobre Júnior pelo fato de ter sido mais do que meu professor e orientador. Por ter sido um amigo e por ter apostado em mim num momento que poucos apostariam. Agradeço por ter permitido que Deus o usasse para me levantar e desejo que Ele continue te usando como um canal para abençoar outros.

Aos meus professores e amigos Bruno de Athayde Prata e Giovani Cordeiro Barroso pelo que me ensinaram e por terem apostado em mim. Pelo entusiasmo e confiança transmitidos na realização deste trabalho.

À professora Verônica Castelo Branco e ao professor Bruno Vieira Bertoncini pela metodologia aplicada na disciplina de Projeto de Graduação (PG), contribuindo da melhor forma possível para a realização deste trabalho.

Ao Corneli Júnior por ter dedicado tempo e paciência para me ensinar e instruir nos conhecimentos usados para a realização deste trabalho. Obrigado!

Aos amigos do Laboratório de Logística e Redes de Infraestruturas (LRI) por serem amigos fiéis a toda a hora. Pelos momentos de descontração e aprendizado que tivemos juntos.

Aos meus amigos da turma de Engenharia Civil que contribuíram para a minha formação.

Ao Programa de Estudantes-Convênio de Graduação (PEC-G) por possibilitar o intercâmbio estudantil e cultural.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) por proporcionar uma boa formação.

Àos meus amigos e irmãos da Igreja Adventista do Sétimo Dia (IASD) de Parangaba pelas constantes orações que o Senhor escutou e atentou de acordo com a sua vontade.

RESUMO

A realização dos serviços de terraplenagem deve ser considerada de forma cautelosa pelos engenheiros porque a escolha aleatória dos equipamentos para tais obras pode causar o desperdício do tempo e dinheiro empregados. No contexto brasileiro as equipes para realização da terraplenagem são escolhidas através de um método de dimensionamento que se mostra limitado na medida em que não fornece soluções que minimizem tanto os custos quanto os tempo de operação das obras. Este cenário traduz numa problemática para a indústria da construção rodoviária pois a soma dos gastos tende a ser maior do que se espera e os prazos de projeto podem não ser cumpridos. Soluções como a modelagem têm sido usadas para analisar a dinâmica de funcionamento das obra de terraplenagem para que esses objetivos sejam cumpridos. Este trabalho representa parte deste esforço e tem como objetivo a avaliação do impacto da seleção racional de equipamentos para as obras de terraplenagem nos custo e tempo de operação. Para tal reuniu-se um conjunto de produções científicas para sustentar a pesquisa e um modelo de redes de Petri coloridas foi criado para o auxílio na tomada de decisão, sendo este comparado com o método tradicional de dimensionamento de equipes de terraplenagem. O modelo mostrou-se mais eficaz do que método usado na prática, pois possibilitou a análise de diferentes configurações de equipamentos e uma melhor compreensão de determinados fatores que afetam as operações de terraplenagem. De todas as equipes modeladas 69,4% tiveram um tempo de operação menor do que o tempo da equipe proposta pelo método tradicional. Apesar de apenas 39,4% das equipes terem obtido um custo de operação menor do que a configuração proposta pelo método, o modelo foi eficaz no redução de custos pois uma das equipes obteve um custo de operação com desvio de 9,14%, o que significa uma redução de R\$ 60.183,60. Conclui-se que o modelo se apresenta como uma alternativa eficaz em relação ao uso determinístico do método tradicional, pois permite a análise de várias configurações de equipamentos que possibilitam uma maior gama de equipes para a tomada de decisão.

Palavras-chave: Movimentação de terra. Configuração de equipamentos. Modelagem. Simulação.

ABSTRACT

The completion of the earthwork should be considered cautiously by engineers, because the random equipment choice for such operations can cause money and time waste. In the Brazilian context the teams to perform the earthwork are chosen through a sizing method which shows limited insofar as it does not provide solutions to minimize both the costs and the operating time of the works. This scenario translates it's self into a problem for the road construction industry as the sum of the expenses tend to be higher than expected and the project deadlines can not be met. Solutions such as modeling have been used to analyze earthmoving operation's dynamics so that these objectives are met. This work is part of this effort and aims at evaluating the earthwork equipment rational selection impact in terms of cost and operating time. To this end, a set of scientific production was met to support the research and a colored Petri nets model was created to decision making aiding, which was compared with the traditional earthmoving teams sizing method. The model proved to be more effective than the method used in practice as it enabled the different equipment configurations analysis and a better comprehension of certain factors that affect the earthmoving operations. Of all the teams that were modeled 69.4% had less operating time than the staff time proposed by the traditional method. Although only 39.4% of the teams had obtained na operation cost lower than the configuration method proposed by method, the model is effective in reducing costs because one of the teams obtained a 9.14% operation cost deviation, which means a reduction of R \$ 60,183.60. We conclude that the model is presented as an effective alternative to the the traditional method deterministic use because it allows the analysis of various equipment configurations that allow a wider range of teams for decision making.

Key-words: Earthmoving. Equipment Configuration. Modeling. Simulação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de etapas metodológicas	16
Figura 2 - Exemplo de uma rede de Petri	21
Figura 3 - Exemplo de uma rede de Petri colorida	22
Figura 4 - Ambiente do <i>Simphony</i>	29
Figura 5 - Processo de seleção de equipamentos e de análise de dados	30
Figura 6 - Principais módulos de sistema	37
Figura 7 - Modelo ACD de terraplenagem	41
Figura 8 - Nível de topo do modelo de terraplenagem	42
Figura 9 - Sub-modelo: Carregadeira Carregando	43
Figura 10 - Sub-modelo: Caminhão Carregando	44
Figura 11 - Sub-modelo: Carregadeira Voltando	44
Figura 12 - Sub-modelo: Caminhão Voltando	45
Figura 13 - Hierarquia do modelo	46
Figura 14 - Variação do tempo com o número de caminhões e carregadeiras	56
Figura 15 - Variação do custo como o número de caminhões e carregadeiras	57
Figura 16 - Variação do custo com o número de caminhões e carregadeiras	57
Figura 17 - Variação do tempo com o regime de trabalho	60
Figura 18 - Variação do tempo com o fator de operador	61
Figura 19 - Variação do tempo com o fator redução de velocidade	62
Figura 20 - Variação do tempo com o coroamento do caminhão	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das simulações entre FPC e o EMSP (Marzouk e Moseli)	32
Tabela 2 - Agentes de controlo para escavação (Wand) - Continua	33
Tabela 3 - Movimentos primitivos para agentes de escavação (Wand)	34
Tabela 4 - Otimização (Moseli e Alshibani)	37
Tabela 5 - Configuração de equipamentos (Cheng et al.)	38
Tabela 6 - Conjunto de cores usadas no modelo, suas variáveis e lugares associados	47
Tabela 7 - Transições do modelo e suas distribuições de disparo	50
Tabela 8 - Resumo das equipes modeladas - Continua	51
Tabela 9 - Número de caminhões atendidos pelas carregadeiras	55
Tabela 10 - Comparação das melhores equipes com o método tradicional.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Problemática e Justificativa.....	12
1.2	Problema de Pesquisa.....	13
1.3	Questões de Pesquisa.....	13
1.4	Objetivos.....	13
<i>1.4.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>13</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Objetivo específico.....</i>	<i>14</i>
1.5	Metodologia.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Simulação.....	17
2.2	Fundamentos de redes Petri coloridas.....	19
<i>2.2.1</i>	<i>Redes de Petri.....</i>	<i>19</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Redes de Petri coloridas.....</i>	<i>21</i>
2.3	Método de dimensionamento de equipes de terraplenagem.....	23
2.4	Revisão bibliográfica.....	25
<i>2.4.1</i>	<i>Simulação.....</i>	<i>25</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Redes de Petri Coloridas.....</i>	<i>26</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Terraplenagem.....</i>	<i>27</i>
3	MODELO PROPOSTO.....	41
4	ESTUDO DE CASO.....	49
4.1	Dados.....	49
4.2	Replicações.....	50
4.3	Comparação com o método tradicional de dimensionamento.....	58
4.4	Análise do comportamento do modelo.....	59
<i>4.4.1</i>	<i>Regime de trabalho.....</i>	<i>59</i>
<i>4.4.2</i>	<i>Fator de correção do operador.....</i>	<i>60</i>
<i>4.4.3</i>	<i>Uso do fator de redução de velocidades.....</i>	<i>62</i>
<i>4.4.4</i>	<i>Coroamento da caçamba do caminhão.....</i>	<i>62</i>
5	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

APÊNDICE A – LISTA DE CORES, VARIÁVEIS E CONTANTES USADAS NO MODELO	68
APÊNDICE B – LISTA DE FUNÇÕES USADAS NO MODELO.....	71
APÊNDICE C – GRÁFICO COMPLETO: CUSTO X TEMPO	74
APÊNDICE D – CÁLCULOS PELO MÉTODO DE TRADICIONAL DE DIMENSIONAMENTO	75
APÊNDICE E – PARÂMETROS DE TEMPO DE ACORDO COM REGIME DE TRABALHO	76
APÊNDICE F – TABELA BASE PARA O GRÁFICO DA FIGURA 14	77
APÊNDICE G – TABELA BASE PARA OS GRÁFICOS DAS FIGURAS 15 16.....	78
APÊNDICE H - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA UMA CARREGADEIRA	79
APÊNDICE I - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA DUAS CARREGADEIRA	80
APÊNDICE J - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA TRÊS CARREGADEIRA	81
APÊNDICE K - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA QUATRO CARREGADEIRA	82
APÊNDICE L - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA CINCO CARREGADEIRA...	83
APÊNDICE M - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA REGIME DE TRABALHO, FATOR DE OPERADOR, COROAMENTO E FATOR DE REDUÇÃO DE VELOCIDADE	84

1 INTRODUÇÃO

“Estudos na área de crescimento econômico indicam que o desenvolvimento da infraestrutura é essencial na determinação do nível de renda “per capita” de um país” (DORNELAS, 2013, p. 27). Os elementos da infraestrutura de um país, tais como as rodovias, os aeroportos, os portos, os sistemas de telecomunicações, são um motor de desenvolvimento pois facilitam a realização dos serviços nas diversas áreas de atuação do homem, podendo trazer benefícios relacionados a custos, conforto, prazos, saúde, educação, etc. Por conta disto, houve um acréscimo nos investimentos na infraestrutura nos últimos anos.

As estradas brasileiras receberam cerca de R\$ 3,3 bilhões em investimentos públicos e privados em 2003 e R\$ 13 bilhões em 2010. Entre 2007 e 2010, segundo o governo federal, diversas obras foram concluídas: 1.306 quilômetros de estradas foram duplicados, 1.789 quilômetros foram pavimentados e 3.282 foram concedidos para empresas privadas, que administram 15 mil quilômetros - menos de 1% da malha pavimentada. Há obras de duplicação em 1.592 quilômetros e de pavimentação em 3.524 quilômetros em execução, além de serviços de sinalização e de manutenção contratados para mais de 50 mil quilômetros da malha. Para o setor privado, há potencial imediato para conceder, no mínimo, mais 12 mil quilômetros. Segundo o último relatório do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), o Brasil ganhou, entre 2007 e 2010, 909 novos quilômetros de linhas férreas, principalmente devido ao avanço da ferrovia Norte-Sul. Outros 3.757 quilômetros têm obras em diferentes estágios de execução. Além disso, há estudos e projetos sendo elaborados para ampliar a malha em mais 6.925 quilômetros. Segundo dados da instituição Contas Abertas, especializada na análise do orçamento público, os aeroportos brasileiros receberam, em valores atualizados, R\$ 4,3 bilhões em investimentos entre 1995 e 2010 (ABDIB, 2011). Como parte do processo construtivo da infraestrutura de um país, as obras de terraplenagem representam uma parcela de grande importância.

“De forma genérica pode-se definir terraplenagem ou movimento de terras como o conjunto de operações necessárias à remoção do excesso de terra para locais onde esta esteja em falta, tendo em vista um determinado projeto a ser implantado” (RICARDO; CATALANI, 2007, p. 21). Considerando-se para as obras de Engenharia Civil como estradas, pontes, edifícios, barragens, vias férreas, aeroportos, pode-se notar que a maioria delas, senão todas, requer serviços de movimentação de terra que lidam com grandes quantidades de material e de equipamentos pesados. Os custos de aquisição ou aluguel, operação e manutenção destes

equipamentos são elevados e aliados a grandes momentos de transporte (elevados volumes a serem transportados ao longo de grandes distâncias), encarecem as operações de movimentação de terra. Por causa disto, a seleção ótima destes equipamentos é de suma importância. Várias respostas têm sido dadas para solucionar este problema.

A modelagem é um método eficaz para representar a realidade e identificar suas funcionalidades e características. A simulação é uma das ferramentas mais usadas para a análise e compreensão dos sistemas reais, pois permite representar, da forma mais fiel possível, comportamentos destes sistemas como: variabilidade de condições, disponibilidade de recursos, incertezas, sendo pertinente para a análise e melhoria do atual estado da prática. Esta ferramenta dá uma capacidade de “previsão” aos tomadores de decisão e aos empreiteiros, possibilitando fazer mudanças que combatam problemas envolvidos com a realidade do canteiro de obras”.

A rede de Petri Colorida (RPC) é uma linguagem de simulação gráfica para construir modelos de sistemas concorrentes e analisar suas propriedades. A RPC é uma linguagem de modelagem de eventos discretos que combina a capacidade da rede de Petri (RP) com os recursos de uma linguagem de programação de alto nível e que concede a base da notação gráfica e as primitivas para a modelagem de simultaneidade, comunicação e sincronismo“ (JENSEN e KRISTENSEN, 2009, p. 3). Dentre tantas linguagens de modelagem, as redes de Petri têm sido amplamente usadas em diversos setores de atuação humana para representar e solucionar problemas do dia a dia.

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

A infraestrutura de transporte é um grande indicativo do nível de desenvolvimento de um país e “os serviços de terraplenagem e pavimentação, parte desta área, por lidarem com a movimentação de milhares de toneladas de material através de grandes distâncias e um grande número de equipamentos pesados, requerem uma atenção especial por parte dos construtores e dos órgãos contratantes” (LIMA E NOBRE JÚNIOR, 2004, p. 8). Na atual prática de Engenharia a escolha de equipamentos para a realização das operações de Terraplenagem não é feita de forma otimizada, conseqüentemente, as obras se tornam dispendiosas. A seleção racional dos equipamentos contribuirá para uma diminuição de prazos bem como uma diminuição dos custos envolvidos.

A RP é uma ferramenta eficiente de modelagem, pois possui métodos de análise bem definidos e poderosos, permite uma abordagem hierárquica dos sistemas, explora as características de concorrência, sincronismo, exclusão mútua, recursos compartilhados e cooperação, presentes nas obras de terraplenagem.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Tendo em consideração o cenário brasileiro apresentado anteriormente, conclui-se que o problema é a falta de otimização na escolha de equipamentos para a realização da terraplenagem, acarretando em elevados custos de operação e em perdas de tempo. Na prática da engenharia é aplicada um modelo tradicional de dimensionamento de frotas de equipamentos que nem sempre condiz com a demanda de produtividade. Essa alocação inadequada dos equipamentos se transforma em elevados custos e longos prazos de execução.

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

- i. É possível modelar um caso prático de terraplenagem através de RPC?
- ii. O método tradicional usado para dimensionamento de equipes produtivas é aplicável a obras de grande porte?
- iii. Existe algum benefício em termos de prazo ou de custos na seleção ótima dos equipamentos de terraplenagem?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a relação entre o custo de terraplenagem e a seleção ótima dos equipamentos envolvidos através de um modelo de Redes de Petri Coloridas (RPC).

1.4.2 Objetivo específico

- i. Modelar um caso prático de terraplenagem através de uma RPC;
- ii. Verificar se o método tradicional usado para dimensionamento de equipes produtivas é aplicável a obras de grande porte;
- iii. Verificar a existência de benefícios em termos de prazo ou de custos na seleção ótima dos equipamentos de terraplenagem.

1.5 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se divide em várias etapas sequenciais e dinâmicas entre, podendo ser intercaladas. A seguir pode-se ver o fluxograma dos passos metodológicos a serem seguidos, na Figura 1, bem como uma descrição de cada uma das etapas.

a) Problema de pesquisa

Na primeira etapa da metodologia define-se um problema de pesquisa baseado na percepção do estado da prática da engenharia, em relação à realização da terraplenagem. Este problema de pesquisa consiste em afirmar que existe uma falta de otimização na escolha de equipamentos para a realização da terraplenagem, acarretando em elevados custos de operação e em perdas de tempo.

b) Revisão bibliográfica

A etapa de revisão bibliográfica consiste em fazer um levantamento de produções científicas que corroboram com a hipótese levantada através do problema de pesquisa. Foram pesquisados artigos científicos de revistas internacionais, teses de doutorado e dissertações de mestrado para confirmar que o problema definido realmente faz parte de realidade da terraplenagem.

c) Aquisição de dados

Nesta etapa procede-se com a aquisição de dados de obras reais de terraplenagem que podem ser usados para alimentar possíveis modelos de simulação. Os dados mais pertinentes são os seguintes: (1) volumes de cortes, de aterros bem como as compensações entre si, (2) distâncias de transportes entre o centroide dos cortes e dos aterros, (3) características dos equipamentos, (4) características do solo, (5)

distribuições de probabilidade que melhor caracterizem os eventos envolvidos, (6) parâmetros das distribuições, etc. Essas informações foram conseguidas através de catálogos da Caterpillar, livros e projetos de engenharias de obras reais realizadas,

d) Concepção do modelo

Esta parte da metodologia consiste em aplicar os conceitos adquiridos sobre terraplenagem para criar um modelo de simulação que represente bem a lógica dessas operações. O modelo de RPC foi desenvolvido no ambiente do software CPNTools 4.0.1, desenvolvido na universidade de Aarhus. Um modelo conceitual foi desenvolvido para auxiliar na modelagem.

e) Aplicação de um caso prático

Os modelos de simulação precisam ser testados e validados, por isso esta etapa consiste em aplicar um caso real de engenharia para validar o modelo, comparando-o com uma solução atingida através de métodos tradicionais de dimensionamento de equipes mecânicas.

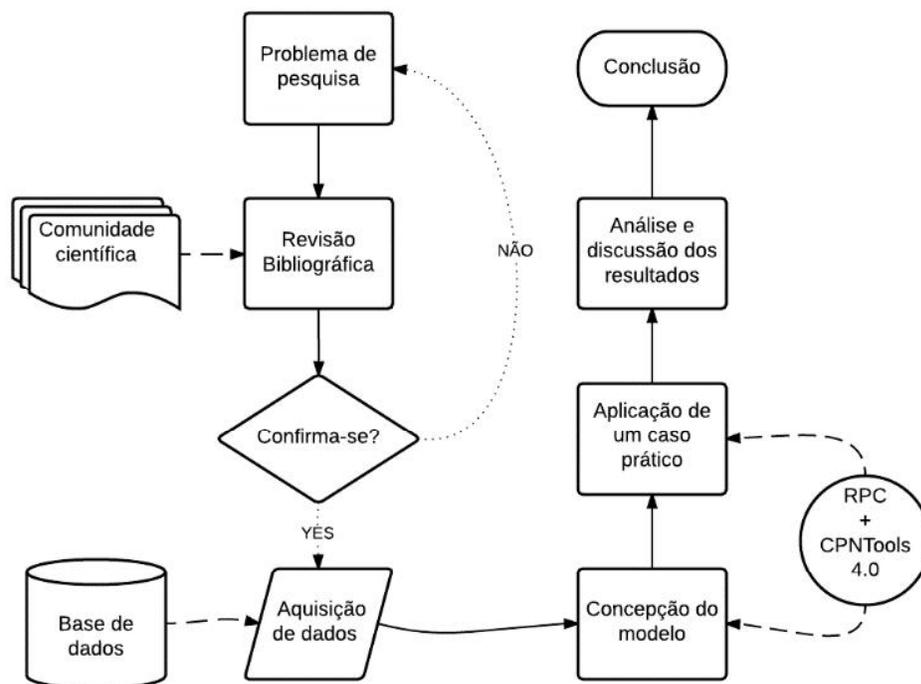
f) Análise e discussão dos resultados

Nesta etapa realiza-se uma coleta e análise dos dados gerados pelo simulador após várias replicações. Uma discussão é feita para interpretar os resultados e extrair informações pertinentes.

g) Conclusão

Realizadas todas as partes metodológicas, na conclusão avalia-se se os objetivos foram alcançados, sumariza-se os resultados obtidos e faz-se sugestões necessárias.

Figura 1 - Fluxograma de etapas metodológicas



Fonte: Criado pelo autor

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Simulação

A simulação é uma ferramenta de representação, análise e compreensão da realidade. Para entender melhor este conceito, requer-se o conhecimento de termos como sistema e modelo. Um sistema é um conjunto de entidades físicas que fazem parte da realidade de um grupo de pessoas e que é objeto do seu interesse. Os sistemas são estudados com o objetivo de serem compreendidos e modificados de acordo com as necessidades do grupo de pessoas que os usa. Como exemplo tem-se: processos de atendimento em bancos, malhas viárias, estruturas de prédios, chegada de aviões em terminais aeroportuários, atendimentos em hospitais, redes de telefonia, etc.

Na grande maioria dos casos os sistemas são grandes e complexos, o que exige esforços adicionais para o seu estudo e em outros casos apenas uma parte ou algumas características do sistema são de real interesse. Desta forma, para facilitar o estudo e análise dos sistemas, são criadas representações dos sistemas reais, chamados de modelos de simulação. Os modelos são representações simplificadas dos sistemas, baseadas no nível de análise e abstração que se quer. Como exemplo de modelos de sistemas reais tem-se: plantas arquitetônicas, projetos de cálculo estrutural, desenhos de peças mecânicas em CAD, túneis de vento para simulação do comportamento do ar em relação a determinados objetos, bonecos de teste de colisão, robôs simuladores de voo, etc.

De acordo com Banks (1999), simulação é a imitação das operações de um processo do mundo real ou sistema ao longo do tempo. Segundo Shannon (1975), simulação é o processo de desenvolver um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com tal modelo com o propósito de compreender o comportamento do sistema ou avaliar várias estratégias para a operação do mesmo. Shannon também diz que todo o modelo ou representação de alguma coisa é uma forma de simulação. O uso da simulação tem sido cada vez mais frequente, devido ao avanço da tecnologia e à utilização de modelos computacionais, e isso se deve também ao maior número de vantagens decorrentes da modelagem de sistemas em relação às suas desvantagens. Alguns autores como, SALIBY (1989), BANKS et al. (1996), BANKS (2000), PEGDEN et al. (1995), LAW E KELTON (2000), (*apud* GAVIRA, 2003) citam algumas vantagens e desvantagens do uso da simulação:

Dentre as vantagens do uso da simulação, pode-se citar as seguintes:

- Novas políticas, procedimentos operacionais, regras de decisão, caminhos para informação, procedimentos organizacionais podem ser explorados sem interromper operações do sistema real;
- Novos projetos de *hardware*, *layouts* físicos, sistemas de transporte podem ser testados sem obrigar investimentos antes que se tenha definido a melhor solução;
- Hipóteses sobre como e porque determinado fenômeno ocorre podem ser testadas;
- A velocidade de simulação pode variar para menos ou mais dependendo do fenômeno que está sendo investigado;
- Percepção de processos pode ser obtida sobre a interação das variáveis ou pela importância destas na performance do sistema;
- Análise de gargalos pode ser executada para indicar onde WIP, informações, materiais, entre outros sofrem atraso excessivo;
- O estudo via Simulação pode auxiliar no entendimento do funcionamento do sistema de forma geral;
- Questões do tipo “*What if*” podem ser respondidas;
- Permite um processo de modelagem evolutivo, começando-se de modelos mais simplificados para outros de maior complexidade, identificando assim peculiaridades do sistema de maneira mais clara;
- Permite avaliar sistemas que se tem conhecimento parcial de suas variáveis ou relações;
- Facilidade de compreensão em relação a um conjunto de equações matemáticas;
- Grande flexibilidade, por proporcionar a aplicação dos mais variados problemas;
- Avaliação do modelo ao longo do tempo;
- Diagnóstico de problemas;
- Treinamento de equipes a partir dos erros e acertos visualizado na simulação.

Considerando as desvantagens do uso da simulação, o seguinte pode ser dito:

- Dependendo do modelo a ser desenvolvido e da complexidade do processo, construir o modelo exigirá treinamento especial e experiência;
- Resultados de simuladores podem ocasionar conclusões erradas se não forem interpretados de maneira correta;
- Simular e analisar modelos pode demandar bastante tempo e omitir recursos em um modelo pode comprometer a validade do modelo;
- Simulação é utilizada em alguns casos onde uma solução analítica é possível ou até preferível. Isto acontece na Simulação de linhas de espera onde teoria de filas é a mais indicada;
- Dificuldade na modelagem;
- Baixa precisão de resultados devido à amostragem frequentemente indevida.

2.2 Fundamentos de redes Petri coloridas

2.2.1 Redes de Petri

Uma rede de Petri é um tipo de linguagem gráfica e matemática para modelagem de sistemas discretos, desenvolvida por Carl Adam Petri em 1962 como resultado de sua tese de doutorado, intitulada de *Comunicação com autômatos*, pela universidade de Darmstadt, Alemanha. Segundo Cardoso e Valette (1997) ela pode ser aplicada em diversos casos, em que se destacam: avaliação de desempenho, análise e verificação formal em sistemas discretos, protocolos de comunicação, controle de oficinas de fabricação, concepção de software tempo real e/ou distribuído, sistemas de informação (organização de empresas), sistemas de transporte, logística, gerenciamento de base de dados, interface homem-máquina e multimídia.

Cardoso e Valette (1997) apresentam algumas vantagens da utilização das redes de Petri:

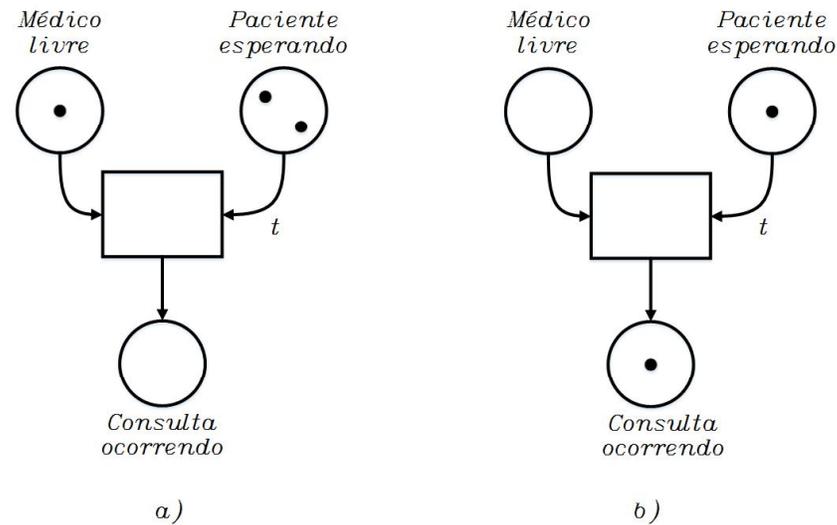
- Pode-se descrever uma ordem parcial entre vários eventos, o que possibilita levar-se em conta a flexibilidade;
- Os estados, bem como os eventos, são representados explicitamente;
- Uma única família de ferramentas é utilizada através da especificação, da modelagem, da análise, da avaliação do desempenho e da implementação;

- Uma única família de ferramentas é utilizada nos diversos níveis da estrutura hierárquica do controle, o que facilita a integração destes níveis;
- Uma descrição precisa e formal das sincronizações torna-se possível, o que é essencial para alcançar-se a necessária segurança de funcionamento.

O funcionamento da rede de Petri é baseado em estados de um sistema e em eventos de mudança de estados, que podem ser sequenciais, paralelas, síncronas ou competitivas entre si. Os estados e as transições de estados são representados por elementos geométricos distintos. A representação gráfica das redes de Petri é definida através dos 4 elementos básicos que se seguem:

- **Lugar:** representado por figuras circulares ou ovais, modelam os estados do sistema. Os lugares também podem representar condições de espera ou processamento, execução de atividades, disponibilidade de recursos, armazenamento de itens, etc. Na Figura 2, uma rede simples é representada com os seguintes lugares: *médico livre*, *pacientes esperando* e *consulta ocorrendo*.
- **Ficha:** As fichas são elementos pontuais presentes nos lugares. A sua presença num determinado lugar indica que a condição associada ao lugar se verifica. Por exemplo, considerando a Figura 2 se existe uma ficha no lugar *médico livre*, isto quer dizer que há um médico pronto para o atendimento. Se não houver uma ficha neste lugar quer dizer que não há médicos disponíveis para consultas. Da mesma forma se houverem três fichas no lugar *pacientes esperando*, quer dizer que existe uma fila de três paciente esperando para serem atendidos
- **Transição:** modelados através de figuras quadrangulares ou retangulares, representam as mudanças de estados. Quando existe a possibilidade de mudança de um estado para outro diz-se que a transição está habilitada e quando tal mudança ocorre diz-se que ela foi “disparada”. No exemplo abaixo, quando a transição *t* for disparada haverá uma mudança de um estado em que um médico está disponível para consultas e dois pacientes estão esperando, para um estado em que não há nenhum médico esperando, há um paciente esperando na fila e uma consulta ocorrendo.
- **Arco:** representados por setas que ligam lugares a transições ou transições a lugares. Uma seta não pode ligar dois elementos do mesmo tipo. Os arcos podem ter “pesos” que são inteiros positivos que definem o número de fichas que são retiradas de um lugar ao se disparar uma transição.

Figura 2 - Exemplo de uma rede de Petri



Fonte: Criado pelo autor.

Formalmente falando, uma rede de Petri é uma rede da forma $RP = (L, T, E, S, M)$, onde:

- $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;
- $E: L \times T \rightarrow N$ é uma função que define arcos de lugares para transições, onde N é um conjunto de inteiros não negativos;
- $S: T \times L \rightarrow N$ é uma função que define arcos de transições para lugares, onde N é um conjunto de inteiros não negativos;
- $M_0: L \rightarrow N$ é a marcação inicial.

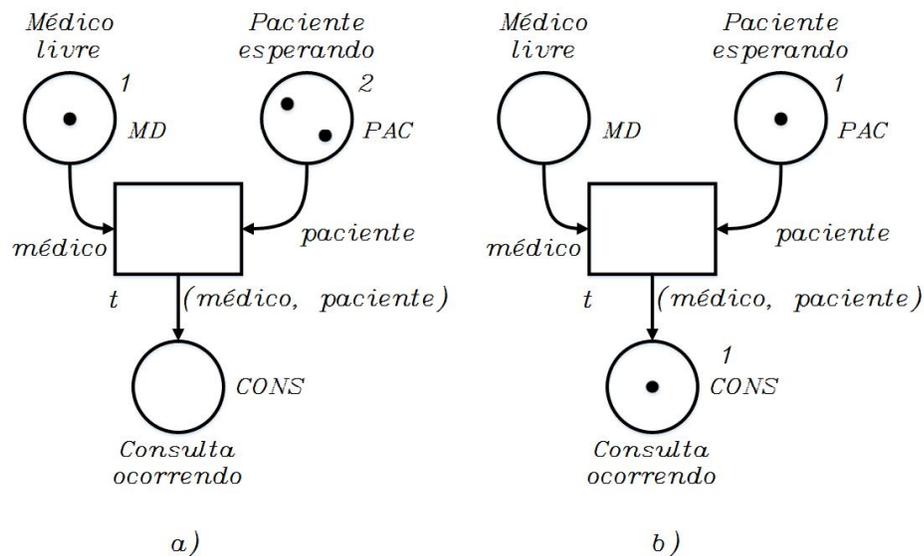
Uma marcação é o conjunto de fichas presentes em todos os lugares de uma rede de Petri.

2.2.2 Redes de Petri coloridas

Numa rede de Petri as fichas representam uma condição negativa ou afirmativa em relação ao estado de um lugar. Nas redes de Petri coloridas são introduzidas o conceito de “cor”, semelhante ao conceito de dados presente na maioria das linguagens de programação, que diferencia as fichas umas das outras. Dessa forma pode-se modelar cores do tipo *INT*, *BOOL*, *STRING*, *PRODUCT*, *LIST*, *REAL*, etc. Como as cores diferenciam as fichas, cada lugar é também diferenciado dos outros pela cor da ficha que pode receber e da mesma forma as transições têm um conjunto de cores que podem habilitá-las.

O exemplo da Figura 2 pode ser transformado numa rede de Petri colorida se forem criadas e associadas as cores *MED*, *PAC* e *CONS* aos lugares *Médico livre*, *paciente esperando* e *consulta ocorrendo*, respetivamente. Também é necessário criar as variáveis *médico* e *paciente* dos tipos *MED* e *PAC*, respetivamente. A cor *CONS* será um produto das cores *MED* e *PAC*. A Figura 3 resume o exposto.

Figura 3 - Exemplo de uma rede de Petri colorida



Fonte: Criado pelo autor

Segundo Jensen e Kristensen (2009), formalmente falando uma rede de Petri colorida é uma rede da forma: $RPC = (L, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$, onde:

- $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições tal que $L \cap T = \emptyset$,
- $A \subseteq L \times T \cup L \times T$ é um conjunto de arcos direcionais;
- Σ é um conjunto finito de conjuntos de cores não vazios;
- V é um conjunto finito de variáveis tal que $Tipo[v] \in \Sigma$ para todas as variáveis $v \in V$;

- $C : L \rightarrow \Sigma$ é uma função de conjunto de cores que associa um conjunto de cores a cada lugar;
- $G: T \rightarrow EXP_V$ é uma função de guarda que associa uma guarda a cada transição t tal que $Tipo[G(t)] = Bool$;
- $E: A \rightarrow EXP_V$ é uma função expressão de arco que associa uma expressão de arco a cada arco a tal que $Tipo[E(a)] = C(l)_{MS}$, onde l é um lugar conectado ao arco a ;
- $I: L \rightarrow EXP_{V\emptyset}$ é uma função de inicialização que associa uma expressão de inicialização a cada lugar l tal que $Tipo[I(l)] = C(p)_{MS}$.

Uma guarda é uma expressão booleana que é avaliada como *verdadeiro* ou *falso*, respectivamente habilitando ou não uma transição.

2.3 Método de dimensionamento de equipes de terraplenagem

O método de dimensionamento de equipes é usado, no atual estado da prática do setor de engenharia, pelos engenheiros e empreiteiros para selecionar equipes mecânicas de caminhões e carregadeiras para realização da terraplenagem. Este método, descrito por Ricardo e Catalani (2007), é apresentado abaixo.

A produção da carregadeira é definida da seguinte forma:

$$Q = 3600 \times (C \times \varphi \times E \times k) / T \quad (4)$$

Em que:

- Q : produção da carregadeira em m^3/h ;
- C : capacidade da carregadeira em m^3 ;
- φ : fator de empolamento do solo;
- E : fator de eficiência da produção da carregadeira;
- K : fator de eficiência da caçamba;
- T : tempo de ciclo da carregadeira em s.

O número de caçambadas da carregadeira para carregar o caminhão é definido abaixo.

$$n = q / (C \times k) \quad (2)$$

Em que:

- n: número de caçambadas para carregar um caminhão;
- q: capacidade do caminhão em m³;
- C: capacidade da carregadeira em m³;
- K: fator de eficiência da caçamba;

O tempo para a carregadeira carregar um caminhão define-se através do seu tempo de ciclo e do número de caçambadas.

$$t_c = n \times T \quad (3)$$

Em que:

- t_c: tempo para carregar um caminhão em s;
- n: número de caçambadas para carregar um caminhão;
- T: tempo de ciclo da carregadeira em s.

O tempo de ciclo do caminhão é calculado da seguinte forma.

$$t_{cm} = t_c + 3600 \times DMT \times [1 / V_c + 1 / V_v] + t_d + t_m \quad (4)$$

Em que:

- t_{cm}: tempo de ciclo do caminhão em s;
- t_c: tempo para carregar um caminhão em s;
- DMT: distância média de transporte em km;
- V_c: velocidade do caminhão cheio em km/h;
- V_v: velocidade do caminhão vazio em km/h;
- t_d: tempo de descarga do caminhão;

- t_m : tempo de manobra do caminhão;

O número de caminhões que podem ser atendidos pela carregadeira será:

$$N = t_{cm} / t_c \quad (5)$$

Em que:

- N: número de caminhões a serem atendidos pela carregadeira;
- t_{cm} : tempo de ciclo do caminhão em s;
- t_c : tempo para carregar um caminhão em s;

2.4 Revisão bibliográfica

2.4.1 Simulação

Desde o final dos anos 1970, vários acadêmicos têm empreendido esforços para que o cenário em relação à falta de otimização na terraplenagem mudasse e muitos teóricos têm apresentado a simulação como sendo uma boa solução. A simulação é uma das ferramentas mais utilizadas para analisar, representar e avaliar sistemas reais. Ela nos permite descrever sistemas reais que de outra forma não seriam bem compreendidos, pois permite-nos implementar hipóteses e condições parecidas com as da realidade.

Segundo AbouRisk (2010):

Através do uso das ferramentas de simulação computacional, podem ser criados modelos que representem a lógica geral de várias atividades requeridas para a criação de instalações, de recursos envolvidos na realização das operações (equipes, equipamentos, gestão, etc.), e do ambiente sob o qual o projeto será executado. (ex., clima, condições do solo, mão de obra, condições de mercado, etc.). Os modelos representam os processos de construção de instalações (bem como os seus ambientes), e como tal podem ser usados para desenvolver melhores planos de projetos, para otimizar a utilização de recursos, para

minimizar custos e duração de projetos, e para aprimorar a gestão de projetos de construção em geral.

Apesar da consciência acadêmica no que diz respeito à necessidade de otimização na terraplenagem através do uso da simulação estar aumentando, no estado da prática não se verifica o mesmo. A indústria da construção não tem visto com os mesmos olhos da academia, que aposta na modelagem e simulação. AbouRisk (2010) diz que os esforços para simplificar o desenvolvimento de modelos, para que forneçam ferramentas mais poderosas, bem como esforços para de integração com outras plataformas, não foram suficientes para mudar o sentimento geral da indústria acerca dessa questão, e apresenta soluções para resolver o problema. Existe a necessidade de se criar modelos que sejam, cada vez mais, fáceis de serem usados e visualizados. Que permitam uma interação confortável entre a plataforma de computacional e o usuário, para que a simulação se torne cada vez mais atraente à indústria da construção. Vários modelos têm sido criados afim de atingir essa meta.

2.4.2 Redes de Petri Coloridas

As RP's estão conquistando o seu lugar dentro do universo modelagem. Por ter uma ferramenta de análise poderosa, uma linguagem matemática robusta e permitir a modelagem de caráter geral, a RP tem sido utilizada para representar, descrever, e analisar os mais diversos sistemas. Melo et al. (2014) apresentam a modelagem, validação e implementação de um Sistema de Recomposição Automática de Alimentadores de Distribuição de Energia usando Sistemas de Multiagentes (SMRA). Maggot (1989 apud Nassar e Casavan, 2008) usou as Redes de Petri para avaliar a performance de processos concorrentes. Desrochers e Sanderson (1995 apud Nassar e Casavant, 2008) e Shih e Leung (1997 apud Nassar e Casavant, 2008) utilizaram as Redes de Petri como uma ferramenta para gestão de sistemas diversos e Kumar e Ganesh (1998 apud Nassar e Casavant, 2008) e Holliday e Vernon (1987 apud Nassar e Casavant, 2008) usaram a RP para alocação de recursos em projetos.

No que diz respeito à terraplenagem, uma revisão da literatura mostra de a RP tem sido utilizada no processo de simulação e otimização. Wang (2004) juntou os conceitos de lógica fuzzy e de Redes de Petri para programar escavação robótica. Wang utilizou a RP para descrever a coordenação e especificação dos agentes de controle de escavação, enquanto a

lógica fuzzy foi usada para implementar movimentos primitivos. Nassar e Casavant (2008) dizem que as RP's têm sido usadas por muitos anos para modelar processos complexos e que as Redes de Petri Temporizada (RPT) podem ser utilizadas para analisar vários aspectos da construção. A proposta apresenta também o uso dos Diagramas de Atividades Cíclicas (DAC) no processo de modelagem das operações de terraplenagem.

Prata et al (2008) desenvolveram um modelo de RPC estocástica que representa uma dinâmica operacional das operações de terraplenagem. Dados reais foram coletadas para validar o modelo através da simulação de diversos cenários no ambiente do CPNTools. O cenário ótimo consiste no conjunto carregadeira-caminhão que minimiza os custos e os prazos de execução. O modelo desenvolvido foi comparado com o estado da prática e mostrou-se robusto e conciso. Cheng et al. (2011) também apresentaram um modelo de RPC, desenvolvido no ambiente do CPNTools, que simula as mudanças dinâmicas nos fluxos de trabalho e de informação no processo de execução da terraplenagem e a relação entre as restrições de diversos equipamentos e as restrições no canteiro.

2.4.3 Terraplenagem

As operações de movimentação de terra estão envolvidas na maioria das construções na área de engenharia civil como as pontes, as rodovias, as barragens, os túneis, as edificações, os desvios de cursos de água, os aterros, os taludes, as contenções, etc. Estes tipos de construções requerem uma preocupação com as incertezas como a aleatoriedade das condições climáticas, a possibilidade de quebra de equipamentos ou de perda de operadores de máquinas. Requerem, também, dos construtores, o uso e a escolha de equipamentos onerosos e pesados, o transporte de grandes quantidades de materiais ao longo de grandes distâncias, o gerenciamento de perdas, a seleção de materiais de melhor qualidade possível, etc.

Na construção de rodovias, a terraplenagem representa uma porção considerável no custo total da construção. Segundo Lapinski (apud Dornelas, 2013), considerando a construção da “State Highway 53, 5.2 miles construction”, o serviço de movimentação de terra (incluindo limpeza e destocamento do terreno, escavação e terraplenagem) representou 48% do custo total do empreendimento. De acordo com Lima e Nobre Júnior (2004), os serviços de terraplenagem e pavimentação, por lidarem com a movimentação de milhares de toneladas de material e um grande número de equipamentos pesados, requerem uma atenção especial por parte dos

construtores e dos órgãos contratantes. Cheng et al. (2011) disseram que na maioria das operações de terraplenagem, os contratantes preferem usar os equipamentos de baixo custo de que disponibilizam para completar as tarefas dentro das faixas limitadas de tempo e de custo, desconsiderando a configuração teórica ideal dos equipamentos.

O estado atual da arte não representa um cenário ideal e melhorias são sugeridas, no que diz respeito à realização ótima destas operações, pois a consideração da racionalização nas obras de terraplenagem representa uma diminuição nos custos e nos tempos de operação.

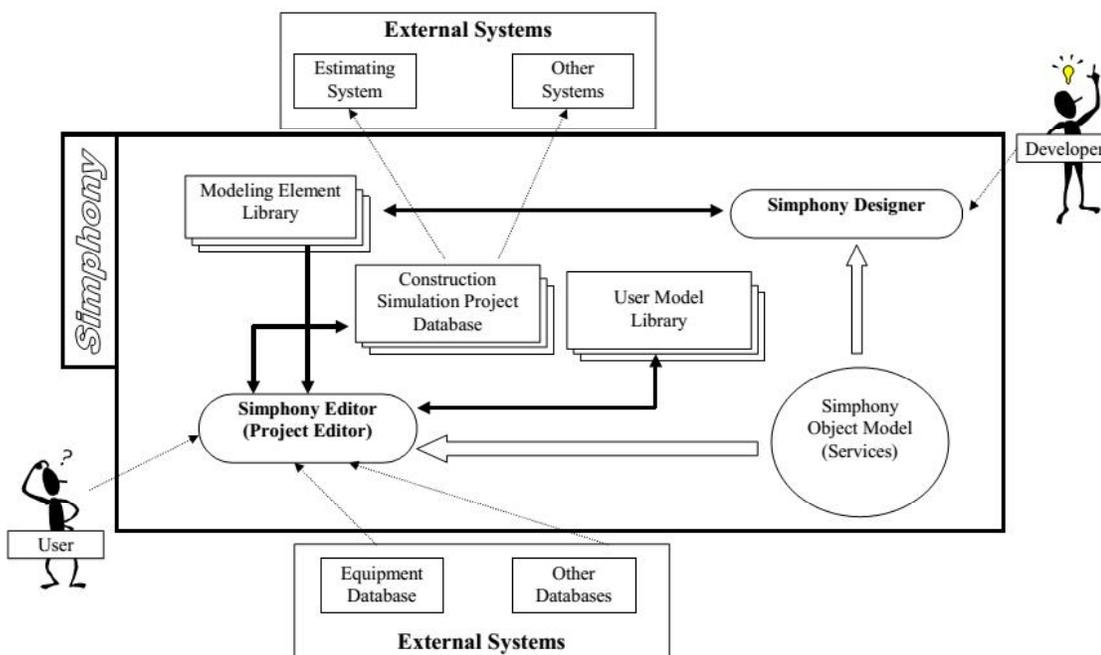
Esforços nesse sentido têm sido feitos pela comunidade acadêmica e muitos métodos e ferramentas foram desenvolvidas, nos últimos anos, para reverter o esse cenário da Engenharia. Cada vez mais pode-se encontrar na literatura artigos e trabalhos acadêmicos que tratam da modelagem dos processos de terraplenagem, e soluções de diversa ordem têm sido apresentadas pelos acadêmicos. Pode-se encontrar na literatura soluções envolvendo teoria de filas (Halpin e Woodhead, 1976), desenvolvimento de softwares específicos (Hajjar e AbouRizk, 1997; Caterpillar, 1998; AbouRizk e Mohamed, 1999), programação linear (Mayaer e Stark, 1981), otimização (Lima e Nobre júnior, 2003), Simulação (Marzouk e Moseli, 2002; Prata et al., 2008), etc. A seguir serão descritas algumas dessas soluções mais pertinentes.

“Simulação computadorizada é uma técnica comprovada para o planejamento de projetos de construção” (HAJJAR; ABOURIZK, 1999). Hajjar e AbouRizk entendem que o uso da simulação é uma opção extremamente viável para a prática da tomada de decisões dentro da realidade da Construção Civil. Também entendem que os simuladores de propósito específico são ferramentas que podem levar para uma transferência efetiva dos conhecimentos da simulação para indústria da construção (HAJJAR; ABOURIZK, 1991).

Tendo em vista a realidade da construção e as possibilidades da simulação, os autores desenvolveram uma plataforma de desenvolvimento e utilização de ferramentas de simulação da construção chamada Simphony, que se adapta tanto à realidade de desenvolvedores como à de usuários comuns. Essa plataforma é resultado da percepção, que os autores tiveram através do desenvolvimento de outras ferramentas, nomeadamente: AP2-Earth (Hajjar e AbouRizk, 1996), CRUISER (Hajjar e AbouRizk, 1998) e CSD (Hajjar, AbouRizk e XU, 1998), de um conjunto de requisitos básicos que qualquer modelo de simulação deve ter. Os requisitos são: (1) a interface do usuário deve suportar representação gráfica e manipulação da estrutura do modelo, (2) os usuários não devem ser expostos aos conhecimentos fundamentais abstratos, (3) as ferramentas de simulação devem ser capazes de acomodar

diferentes tipos de processos, (4) os resultados gerados devem servir aos propósitos imediatos do usuário, (5) as ferramentas de simulação devem ser capazes de se integrar com ferramentas existentes, (6) o usuário deve ser capaz de combinar modelos para a modelagem de projetos completos, (7) as ferramentas devem encorajar o uso de modelos existentes e (8) os desenvolvedores das ferramentas devem ser capazes de desenvolver novas ferramentas num curto espaço de tempo. Baseado nesses requisitos foi desenvolvida uma ferramenta que permite a criação de modelos através de ferramentas de propósitos gerais, usando uma integração com o CYCLONE (Halpin, 1997), e de ferramentas específicas de modelagem vinculadas ao Symphony. Uma visão geral do funcionamento do Symphony é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Ambiente do *Simphony*



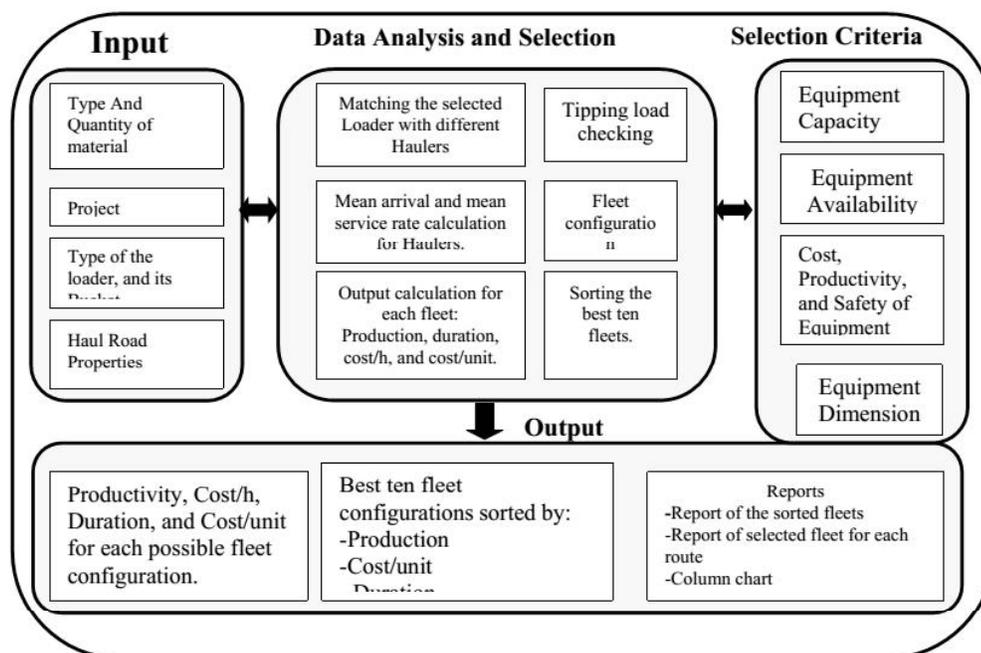
Fonte: HAJJAR E ABOURIZK, 1999.

Como se pode ver, o *Simphony* conta com uma base de dados externa, composta de uma base de dados para informações dos equipamentos e uma base de dados para outras finalidades, e uma base de dados de projetos de simulação da construção, que serve para armazenar os modelos de simulação construídos bem como os resultados gerados a partir do

processamento. Os desenvolvedores e os usuários fazem uso do editor do Symphony para criar *templates* de simulação de propósito específico e usar os templates previamente criados, respectivamente. Os templates são armazenados numa biblioteca de elementos de modelos. Para validar a ferramenta foi feita uma comparação entre o CYCLONE e a plataforma do CYCLONE vinculada ao Symphony e concluiu-se que o tempo levado para se criar templates no último foi menor do que no primeiro num fator de 6. O Symphony facilita a utilização e o desenvolvimento de ferramentas de simulação de propósito específico e permite que tanto usuários principiantes quanto os mais experientes tenham facilidade na interface.

Alkass et al. (2003) apresentam um modelo computacional para escolha, com auxílio da teoria de filas, de conjuntos de equipamentos para operações de terraplenagem chamado *FLSELECTOR*. Essa ferramenta provê ao usuário assistência para tomar decisões quanto à quantidade e capacidade de caminhões, distâncias de transportes e condições de rolamento. A Figura 5 contém um fluxograma do processo de seleção de frotas e da análise de dados que representa o funcionamento da ferramenta.

Figura 5 - Processo de seleção de equipamentos e de análise de dados



O modelo é dividido em três etapas, em que a primeira é a de entradas de dados. O usuário entra com as quantidades de material a ser transportado, condições meteorológicas, eficiência de operadores e as características do canteiro, como altitude e as estradas de rolagem. O modelo é baseado na escolha de um tipo de carregadeira que vai ser combinada com vários tipos de unidades transportadoras, até chegar a uma equipe ótima. Na segunda etapa prossegue-se com as combinações de equipamentos e o cálculo de alguns parâmetros (tempo médio de chegada, tempo médio de serviço, produção, duração, custos por hora e por unidade). Ainda nessa etapa o modelo faz uma seleção das 10 melhores equipes de acordo com os critérios apresentados no fluxograma. A última etapa gera resultados e relatórios e o usuário pode escolher, dentre as 10 melhores equipes, a frota que realizará a operação e repetir o processo para diferentes vias. Por fim, os resultados serão comparados com outros obtidos através de métodos determinísticos.

O modelo apresentado por Alkass et al. é uma boa ferramenta para ajudar os engenheiros na seleção de equipamentos, mas as considerações que faz sobre o comportamento estocástico do processo de carregamento e de transporte não são precisas, pois a distribuição exponencial não é a mais apropriada para representar esses fenômenos.

Martinez (2003) desenvolveu um sistema de simulação geral para modelar operações de construção. EZStrobe é um sistema que pode modelar uma vasta gama de sistemas e disciplinas. É baseado nas *Activity Cycle Diagrams (ACD)* e emprega paradigmas de verificação de atividades trifásicas.

Marzouk e Moseli (2003) apresentam uma ferramenta de simulação, desenvolvida para modelar operações de terraplenagem. O modelo proposto utiliza simulação de eventos discretos, simulação trifásica e orientação a objetos para a seleção da configuração ótima das equipes produtivas, proporcionando aos contratantes a possibilidade de estimar custos e prazos considerando diferentes cenários e a possibilidade de modelar incertezas relacionadas à duração das atividades. O sistema de simulação desenvolvido chama-se SimEarth e é constituído de quatro componentes principais: (1) *EarthMoving Simulation Program (EMSP)* – Programa de simulação de terraplenagem; (2) *Equipment Cost Application (ECA)* – Aplicativo de custo de equipamentos; (3) *Equipment Database Application* – Aplicativo de Base de Dados de Equipamentos e (4) *Output Recording/Optimizations Module* – Módulo de saída Relatório/Otimização.

Um estudo de caso de uma pedreira foi realizado para se validar o modelo e definir a frota de equipamentos ideal para minimizar a duração e os custos do projeto. Como metodologia para validação foi usado o software FPC da Caterpillar para comparar os resultados em relação ao EMSP. Foram realizadas simulações de quatro cenários e os resultados estão listados na Tabela 1. Pode-se ver que os resultados são bem semelhantes numa margem de 2 a 8%. Os autores reconhecem que o FPC tem diferenças em relação ao EMSP no que diz respeito à consideração de incertezas nos processos de terraplenagem e atribuem isso como causa das diferenças no resultado.

Tabela 1 - Comparação das simulações entre FPC e o EMSP (Marzouk e Moseli)

Cenário	Duração	Produção (tons/h)	Custo direto (\$)	Custo unitário (&/ton)	Diferença em duração (%)
(a) FPC					
Cenário_1	826	272	279,209	1.241	7.7
Cenário_2	667	337	230,62	1.025	4.9
Cenário_3	737	305	249,28	1.108	6.5
Cenário_4	607	371	209,982	0.933	1.7
(b) EMSP					
Cenário_1	767	293	272,285	1.21	7.7
Cenário_2	636	354	230,868	1.206	4.9
Cenário_3	692	325	245,66	1.092	6.5
Cenário_4	597	377	216,711	0.963	1.7

Fonte: MARZOUK E MOSELI, 2003

Lima et al. (2003) visaram o custo mínimo de construção através de um modelo matemático que relaciona os dados geométricas e geotécnicas de uma obra rodoviária com a distribuição de materiais. O modelo de programação linear analisa as características encontradas nas operações de terraplenagem e de pavimentação como a diversificação de camadas de solo, aterros com vários graus de compactação, misturas de solos na pista ou em usinas ao redor do canteiro. Na resolução do modelo utilizou-se o LINGO tendo o EXCEL como interface de entrada de dados. A abordagem não considera os equipamentos envolvidos

mas mostrou que a alocação racional dos materiais proporciona uma redução nos custos da obra.

WANG (2004) concorda que a terraplenagem merece especial atenção, pois afirma a movimentação de terra desempenha um papel essencial em atividades como mineração, construção e tratamento de resíduos perigosos. A tendência para uma crescente automação das máquinas usadas nestas atividades e o investimento em pesquisa relacionada aos equipamentos comprovam isso. Dentre várias soluções para a otimização da escavação encontra-se a escavação robótica, que permite uma melhor previsão da interação máquina-ambiente através de testes com protótipos em laboratórios e posterior implementação em campo.

Logo, Wand formulou e implementou uma metodologia de controle baseado em agentes para programação comportamental Fuzzy em escavação robótica que conta com o auxílio das redes de Petri. Os agentes de controle consistem num conjunto de tarefas, implementadas através da rede de Petri, realizadas pelas máquinas para executarem a escavação, como exemplificado na Tabela 2, e elas são norteadas por um conjunto de movimentos primitivos (Tabela 3) que por sua vez são representados e implementados através de regras de controle baseados em lógica Fuzzy. Através de uma rede Wireless, existe uma central de operações que controla as movimentações da máquina por intermédio de um operador ou de um sistema de controle com movimentações predefinidas.

Tabela 2 - Agentes de controlo para escavação (Wand) - Continua

Typical control agents for excavation tasks	
Name	CA1: Entry-point-mover
Move the bucket to the inicial loading location as instructed by the higher control lever or other modules in the control system;	
Name	CA2: Horizontal-digger
Make the bucket dig forward horizontally along a preset elevation, and small deviations above or below the preset elevation is allowed;	
Name	CA3: Over-particle-follower
Move the bucket to load over the top of encountered over-sized particles by digging in parallel to the surface of the particles;	
Name	CA4: Under-particle-follower
Make the bucket to dig down or underneath encountered over-sized particles within a preset limit on the rotating down angle;	

Tabela 2 - Agentes de controlo para escavação (Wand)

Typical control agents for excavation tasks	
Name	CA5: Bucket-lifter
Lift the bucket from the current position until it clears the pile, and make it hoist forward and up whenever possible to load more materials;	
Name	CA6: Bucket extractor
Recover from failures of executing other control agents by extracting the bucket back to a preset position without considering the loss of loaded materials;	
Name	CA7: Floor-follower
Make the bucket to clear the excavation site by loading forward by maintaining the contact with the floor of the excavation site;	
Name	CA8: Down-digger
Make the bucket to excavate in a downward direction while keeping its orientation at a preset attack angle, and small deviations from the preset attack angle are allowed;	
Name	CA9: Up-digger
Make the bucket to extract over-sized particles within the material pile or from the excavation ground and no special effort is made to prevent the particles from rolling out of the bucket;	
Name	CA10: Pusher
Make the bucket to push over-sized particles away from the loading path to a location determined by other modules of the control system.	

Fonte: WAND, 2004.

Tabela 3 - Movimentos primitivos para agentes de escavação (Wand)

Symbol	Name
pm1	move forward parallel to the bucket bottom
pm2	move upward perpendicular to bucket bottom
pm3	move backward parallel to bucket bottom
pm4	move downward perpendicular to bucket bottom
pm5	move forward up
pm6	move backward up
pm7	move forward down
pm8	move backward down
pm9	dig forward and rotate up
pm10	dig backward and rotate down
pm11	dig forward down and rotate down
pm12	dig backward down and rotate up
pm13	rotate up
pm14	rotate down

Fonte: WAND, 2004

Uma série de dois experimentos foram realizados em laboratório através de um braço robótico PUMA, concluindo-se que a decomposição das tarefas complexas em vários movimentos primitivos simples utilizando as regras da lógica Fuzzy e as redes de Petri na escavação robótica é uma metodologia eficiente para a otimização da escavação. O trabalho de Wang é um passo inicial para a escavação robótica em aplicações reais.

Em 2006 Bargstadt e Blickling escreveram um artigo intitulado “Implementação de uma lógica para processos de terraplenagem com ferramenta de desenvolvimento de jogos”, com o intuito de desenvolver uma plataforma computacional interativa que permita ao usuário mudar o estado da simulação em tempo real, ou seja, durante o processo de simulação. Através de uma interface visual o usuário pode decidir o local das escavações e a movimentação dos equipamentos de acordo com o ponto de carregamento. O modelo conta com uma base de dados que contém informações como o tipo de caminhões e escavadeiras, custo horário, pesos, etc., e que processa cálculos de duração das operações que são salvos numa segunda base de dados que armazena resultados dos processamentos.

Moseli e Alshibani (2007) desenvolveram um modelo para planejar, acompanhar e controlar operações de terraplenagem baseado na combinação de algoritmos genéticos (AG) e tecnologias espaciais como Sistemas de Posicionamento global (GPS) e Sistema de Informação Geográfica (SIG). O modelo visa a formação de equipes ótimas de operação utilizando AG para acelerar o processo de otimização e evitar que equipes irreais sejam formadas. SIG foi usado para automatizar a aquisição de dados e analisar os dados geográficos recolhidos e GPS foi utilizado para a coleta de dados e para o rastreamento de equipamentos em tempo real de construção. Foi usado o Visual C++ para implementar as linhas de código.

O modelo construído visa otimizar o uso de recursos disponíveis ao nível do planejamento bem como ao longo da construção e é constituído de 4 módulos básicos: (1) módulo de base de dados, (2) módulo de otimização de equipes, (3) módulo de monitoramento e controle, e (4) módulo de relatórios, como mostrados na Figura 6. O módulo de base de dados, que foi gerado no sistema de gestão de dados do Microsoft Access, serve para receber e armazenar dados pertinentes à modelagem para atingir os objetivos de planejamento, monitoramento e controle das operações. Os dados são referentes aos equipamentos utilizados (adquiridos através do fabricante), ao projeto e às características do solo.

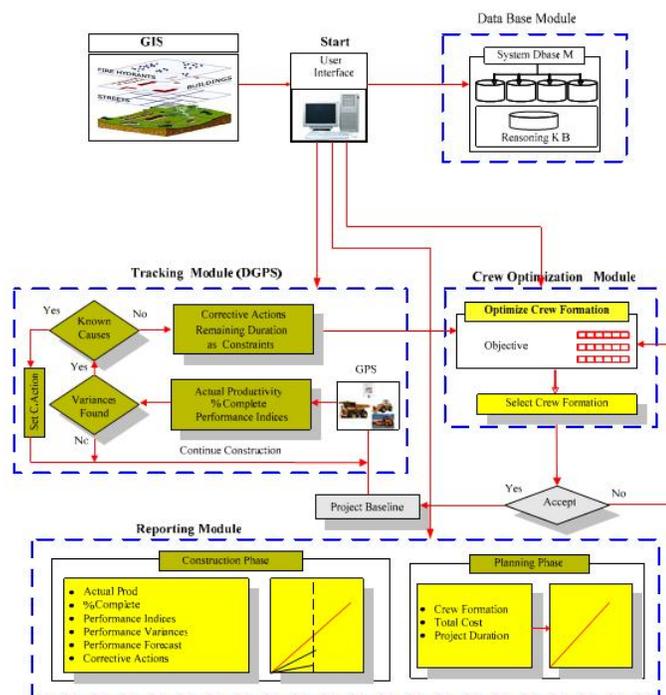
O módulo de monitoramento e controle é baseado em GIS e GPS e automatiza a (1) coleta e aquisição de dados de campo, (2) a estimativa a produtividade atual das equipes,

(3) a medida do desempenho do projeto à data dos relatórios, (4) a detecção de causas da performances inaceitáveis e sugestão de ações corretivas, (5) e a geração de relatórios progressivos. Os dados usados no monitoramento e controle provém de duas fontes que servem de comparação entre si. Os dados dos equipamentos, coletados pelo GPS e transformados em dados de SIG, são transformados em produtividade e comparados com os dados de produtividade e performance *as-planned* salvos na base de dados central. Esse módulo reconfigura a equipes caso os dados de produtividade não estejam de acordo com o desejado. Por fim o módulo de otimização de equipes usa algoritmo genético para procurar soluções viáveis perto do ótimo e otimizar a seleção das equipes. A otimização das equipes pode ser feita em tempo real de acordo com a produtividade das mesmas. O módulo se vale de uma interface de entrada de dados para armazenar informações sobre os equipamentos e as condições das vias. O algoritmo gera várias equipes de acordo com essas informações e com o auxílio de GIS estabelece a melhor via para realizar as operações. Posteriormente são calculadas as produtividades das equipes e o algoritmo avalia a performance de cada uma e, de acordo com uma função objetivo, escolhe o melhor cromossomo (equipe). Um estudo de caso foi realizado para avaliar o modelo em termos de custo e tempo de operação, resultando nos resultados apresentados na tabela 4.

Prata et al. (2008) afirmam que nas operações de terraplenagem, os construtores tendem a usar os equipamentos que têm disponíveis ao invés de fazerem uma alocação ideal das máquinas. Tendo em vista essa problemática Prata et al. (2008) desenvolveram um modelo de simulação baseado nas redes de Petri coloridas, que possibilita ao usuário atingir configurações ótimas de equipes mecânicas compostas de carregadeiras e caminhões para a realização de obras de movimentações de terra de grande porte. As redes de Petri foram usadas por serem capazes de modelar sistemas a eventos discretos que por sua vez podem representar bem as operações de terraplenagem. Como essas operações são de natureza estocásticas, alimentou-se o modelo com distribuições estatísticas para representar esse comportamento o mais próximo possível do real. A distribuição utilizada para a computação dos tempos envolvidos foi a exponencial. O modelo de simulação baseia-se na replicação de várias combinações de equipes carregadeira-caminhão para que se atinja uma configuração ótima em termos de tempo de custo. Para cada frota de equipamentos foram feitas 10 replicações e considerada a média dos tempos de cada uma como sendo o tempo de ciclo da operação. Para a validação do modelo foi simulado um caso real e os resultados foram comparados com o procedimento feito na prática de engenharia.

O modelo apresentado foi mais robusto do que a metodologias aplicada na prática, pois mais de 80% das soluções encontradas pela simulação foram melhores do que os resultados do método tradicional. Os melhores cenários adquiridos pela simulação, em termos de custo e de tempo de ciclo, apresentaram um desvio de 50,2% e de aproximadamente 30%, respectivamente, em relação ao método tradicional.

Figura 6 - Principais módulos de sistema



Fonte: MOSELI E ALSHIBANI, 2007

Tabela 4 - Otimização (Moseli e Alshibani)

Optimization	Loader	Truck	Grader	Compactor	Time (hrs)	Cost(\$)	\$/Q
	992G	777D	24H	433E			
Minimize Time	8	37	7	6	2580,99	39427467	12,2827
Minimize Cost	6	13	1	1	3441,32	16371000	5,10
Minimize Time & Cost	7	15	1	1	2949,7	16948800	5,28

Fonte: MOSELI E ALSHIBANI, 2007.

Da mesma forma, Cheng et al. (2011) usaram as redes de Petri coloridas para desenvolver um modelo de simulação no CPNTools afim de representar da melhor forma possível as operações de terraplenagem. O modelo se baseia na análise das mudanças do fluxo de trabalho e de informações das operações de terraplenagem e na relação de restrição dinâmica entre os equipamentos de construção e as atividades da construção. Esse esforço foi motivado pela percepção dos autores da falta de atenção da comunidade acadêmica para a natureza randômica da ociosidade dos equipamentos, programação inteligente para operações multifuncionais de equipamentos e a dinâmica e aleatoriedade das incertezas na operação de equipamentos em obras de terraplenagem. O modelo desenvolvido é um esforço para auxiliar empreiteiros na escolha de equipes mecânicas que minimizem os custos e a duração dos projetos. Na Tabela 5 estão listados os resultados da modelagem para se atingir as restrições de tempo e de custo.

Tabela 5 - Configuração de equipamentos (Cheng et al.)

Optimization	Excavator WY160	Dozer T3-100	Loader ExQ153	Truck	Time (day)	Cost (RMB)
Minimized time	14	6	7	40	13	6310200
Minimizes cost	7	6	6	40	15	6052200
Minimized time and cost	10	6	7	40	14	6186600

Fonte: CHENG et. al., 2011.

Em 2012, Jade e Markiz desenvolveram um modelo de otimização automatizado num ambiente da Microsoft usando *Visual Basic for Applications (VBA)* para auxiliar os empreiteiros nas multifacetadas operações envolvidas nas obras de terraplenagem. Os autores reconhecem a importância da otimização dessas operações bem como os esforços da comunidade acadêmica nesse sentido, mas consideram que nenhuma das soluções propostas incluem ou executam uma análise econômica operacional e por isso desenvolveram um modelo que permite atingir uma configuração ótima de equipamentos baseada em análises econômicas.

O modelo é consistido de 4 fases principais, das quais: (1) Coleta de dados, (2) análise operacional, (3) análise econômica e (4) processo de otimização. Na primeira fase o usuário fornece informações sobre o custo e performance dos equipamentos, especificações do material e das vias de transporte. A fase de análise operacional consiste em identificar as restrições de cada equipamento. A análise das restrições consiste em comparar os pesos e as

resistências ao rolamento dos equipamentos, LW e TR respectivamente, com pesos e resistências permitidas e designadas pelo usuário, RW e RP respectivamente. O modelo desconsidera os equipamentos que não condisserem com as restrições. Nessa etapa é também calculada a produtividade dos equipamentos baseada na base de dados criada previamente. A análise econômica consiste na busca e seleção dos equipamentos mais baratos. Esse módulo faz uso da base de dados para calcular o preço de operação dos equipamentos (combustível, troca de pneus, reparação, custos de operação, etc.) e comparar o preço de aquisição (preço inicial, taxas, seguro, depreciação, pneus, etc.) com o preço de aluguel. Através de um módulo de análise do custo de aquisição e de operação o modelo escolhe entre a compra dos equipamentos e o aluguel dos mesmos. No processo de otimização é feito o uso de programação linear para determinar a configuração ótimas das equipes de modo a minimizar tempo e custo. Através de um estudo de caso o modelo faz a comparação entre a duração do projeto calculada a partir dos dados do projeto e a duração estimada a partir do volume de material e das produtividades dos equipamentos, chegando a diferenças na faixa de 3,3% a 16,4%.

Como se pode ver as soluções encontradas na literatura são de diversa ordem, visam encontrar a solução da problemática de diferentes maneiras e apresentam inovações distintas. Hajjar e AbouRizk (1999) desenvolveram uma ferramenta que atende às necessidades de desenvolvedores experientes e de usuários comuns, Alkass et al (2003) criaram o FLSELECTOR que permite a escolha adequada da quantidades e tipos de equipamentos para a realização das operações de terraplenagem, Marzouk e Moseli (2003) contribuíram com o EMSP eu permite uma previsão de custo e prazo, Lima et al. (2003) otimizarão o processo de terraplenagem bem como o de pavimentação através do LINGO e do EXCEL, Wand (2004) fez uso da lógica Fuzzy e das redes de Petri para controlar escavações através de ferramentas robotizadas, Bargstadt e Blickling (2006) contribuíram com a simulação através de uma ferramenta de jogos altamente interativa, Moseli e Alshibani (2007) permitiram que o controle das operações fossem melhor realizadas através das ferramentas de SIG e GPS, Prata et al (2008) e Cheng et al (2011) aproveitaram das capacidades poderosas das redes de Petri para criar um modelo de seleção de equipes mecânicas adequadas e por fim Jrade e Markiz (2012) criaram um modelo em VBA focalizado na parte dos custos de equipamentos.

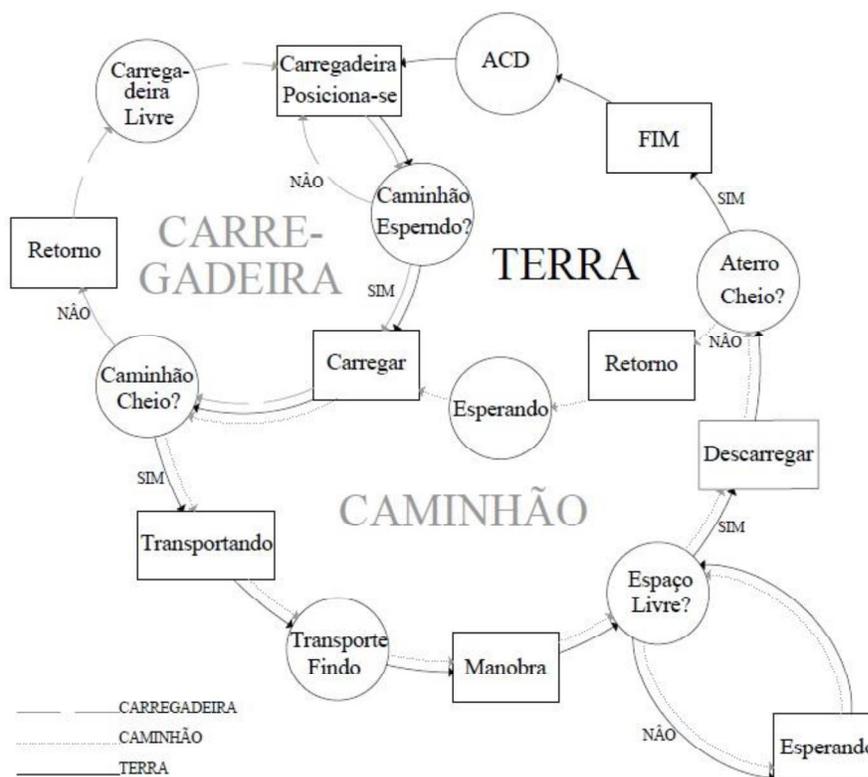
Todas estas contribuições à literatura são de grande importância para que se perceba a realidade da indústria da construção, mas parece que elas ainda não fizeram o suficiente para mudar o *status quo*. Os esforços para simplificar o desenvolvimento de modelos, para que forneçam ferramentas mais poderosas, bem como esforços para de integração com outras

plataformas, não foram suficientes para mudar o sentimento geral da indústria acerca dessa questão (ABOURIZK, 2010). Parece que, apesar dos grandes esforços empreendidos pela comunidade acadêmica, para apresentar e solucionar a problemática que tem sido descrita, o setor da indústria ainda não está a aproveitar os avanços nas tecnologias. Daí vem a necessidade de se desenvolverem ferramentas que sejam cada vez mais atrativas aos empreiteiros e que os convença das mesmas.

3 MODELO PROPOSTO

Como parte do processo de simulação, a construção de um modelo abstrato é muito importante, pois ajuda na melhor compreensão de todo o sistema. Para criar um modelo abstrato foram utilizados os conceitos de modelagem através de ACD, como explicado por Chwif e Medina (2007). Os ACD's foram usados por causa da sua semelhança com a estrutura de modelagem das redes de Petri da facilidade de compreensão. A modelagem pelos ACD's se resume na utilização de duas entidades para descrever o ciclo de um sistema: um círculo que representa uma "fila" e um quadrado que representa uma "atividade". O modelo de redes de Petri coloridas baseia-se no ACD mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo ACD de terraplenagem



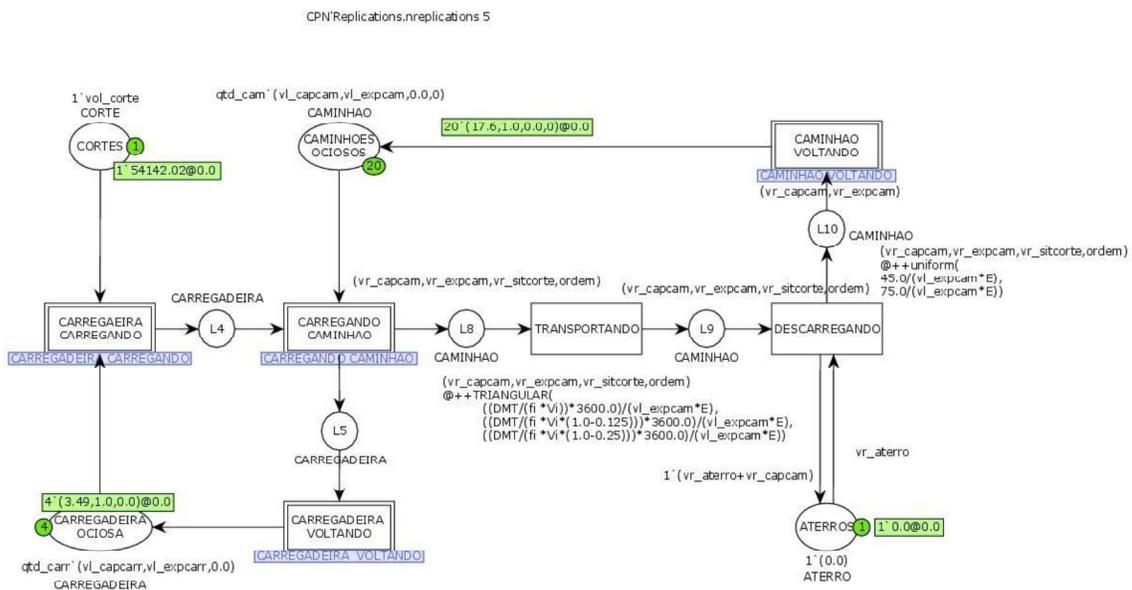
Fonte: Criado pelo autor

Como mostrado no diagrama, todo o sistema é formado por dois ciclos de operações e um caminho de serviço que seguem disciplinas de sincronismo e de paralelismo. A

Carregadeira começa em uma posição livre preparada para encher a sua caçamba, enquanto o caminhão está esperando. Os ciclos da carregadeira e do caminhão se juntam em uma disciplina de sincronismo na posição de carregamento, até que a caçamba do caminhão estiver cheia. Neste momento, se separam um do outro em ciclos paralelos. A Carregadeira retorna e enche a caçamba novamente, enquanto o caminhão transporta o solo para a área de aterro e volta para ser carregado desde que a operação não estiver completa ainda. O material a ser transportado segue de uma situação de corte para uma situação de aterro, tendo uma relação de paralelismo com a carregadeira e de sincronismo com o caminhão.

Devido à magnitude e complexidade das operações de movimentação de terras, procurou-se modelá-las numa rede de Petri hierárquica, de modo que a compreensão e visualização de pode ser mais fácil. Pela mesma razão, foi utilizada uma abordagem Top-Down, o que significa que um modelo mais abstrato foi criado e então refinado em pequenos submódulos. O modelo de nível superior pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Nível de topo do modelo de terraplenagem



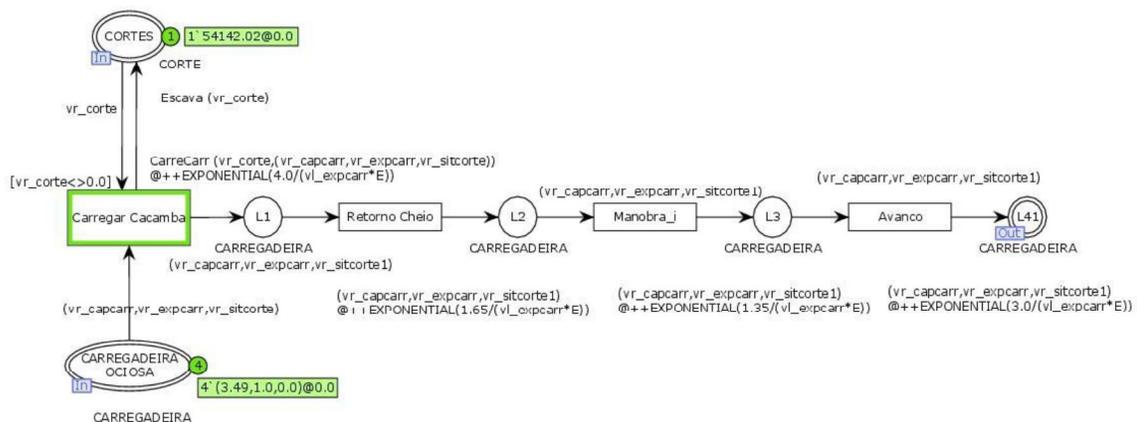
Fonte: Criado pelo autor

Os lugares *Caminhões Ociosos*, *Carregadeira Ociosa* e *Cortes* representam a espera dos caminhões, das carregadeiras e o do solo a ser escavado, respectivamente. Por sua vez

o lugar *Aterro* modela a quantidade de solo disposto pelos caminhões. As transições *Transportando* e *Descarregando* modelam e computam os tempo das operações de transporte e descarregamento do material, respetivamente. O modelo conta com quatro transições de substituição que modelam os sub-módulos do sistema, nomeadamente: (1) *Carregadeira carregando*, (2) *Carregando caminhão*, (3) *Carregadeira voltando* e *Caminhão voltando*.

No primeiro sub-modelo é modelada a operação de escavação do solo através da carregadeira, bem como seus movimentos iniciais para realizar tal operação. Como pode-se ver na Figura 9 os lugares *Carregadeira Ociosa* e *Cortes* modelam, respetivamente, a disponibilidade das carregadeiras e de material a ser escavado. As transições seguintes modelam os movimentos específicos que o equipamento realiza: *Retorno Cheio*, *Manobra* e *Avanço* para a área de carregamento do caminhão.

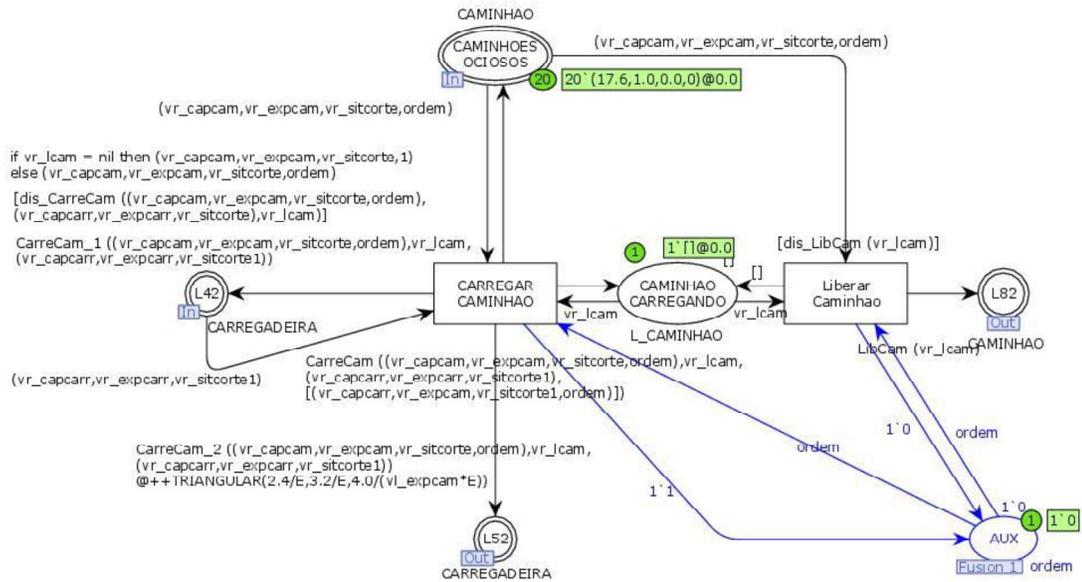
Figura 9 - Sub-modelo: Carregadeira Carregando



Fonte: Criado pelo autor

O segundo sub-modelo (*Carregando caminhão*) é composto por duas transições e seis lugares. Os lugares *Caminhões Ociosos* e *Caminhão Carregando* modelam a fila de caminhões e o carregamento de caminhões específicos, respetivamente, enquanto que as transições *Carregar Caminhão* e *Liberar Caminhão* modelam e computam os tempo para carregar um caminhão com uma caçamba da carregadeira e a operação de liberar o caminhão para o transporte quando estiver cheio. O lugar *Aux* foi criado para auxiliar a controlar a sequência de caminhões que são carregados. A Figura 10 mostra o descrito.

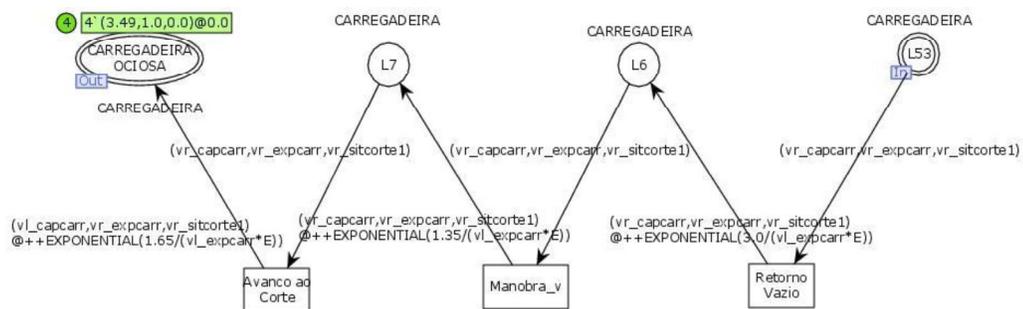
Figura 10 - Sub-modelo: Caminhão Carregando



Fonte: Criado pelo autor

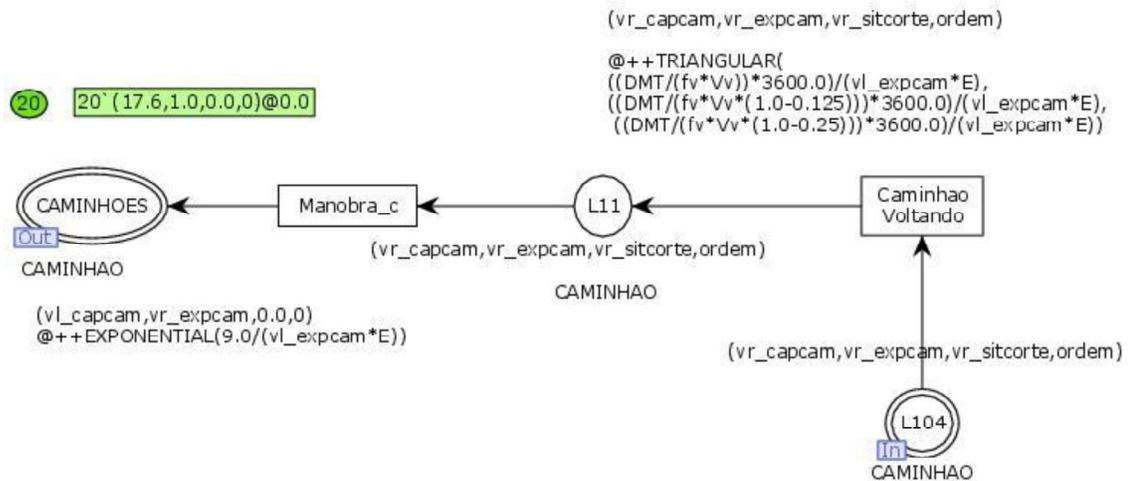
O sub-módulo *Carregadeira Voltando* modela os movimentos de retorno da carregadeira para a posição inicial, onde estará prestes a escavar o solo. As seguintes transições foram usadas: *Retorno vazio*, *Manobra* e *Avanço ao Corte*. Por último, o sub-modelo *Caminhão Voltando* simula a volta do caminhão para a fila de espera, com os seguintes movimentos: *Caminhão voltando* e *Manobra*. As Figuras 11 e 12 ilustram os sub-modelos *Carregadeira Voltando* e *Caminhão Voltando*, respectivamente, e a Figura 13 ilustra e resume a estrutura hierárquica do modelo desenvolvido.

Figura 11 - Sub-modelo: Carregadeira Voltando



Fonte: Criado pelo autor

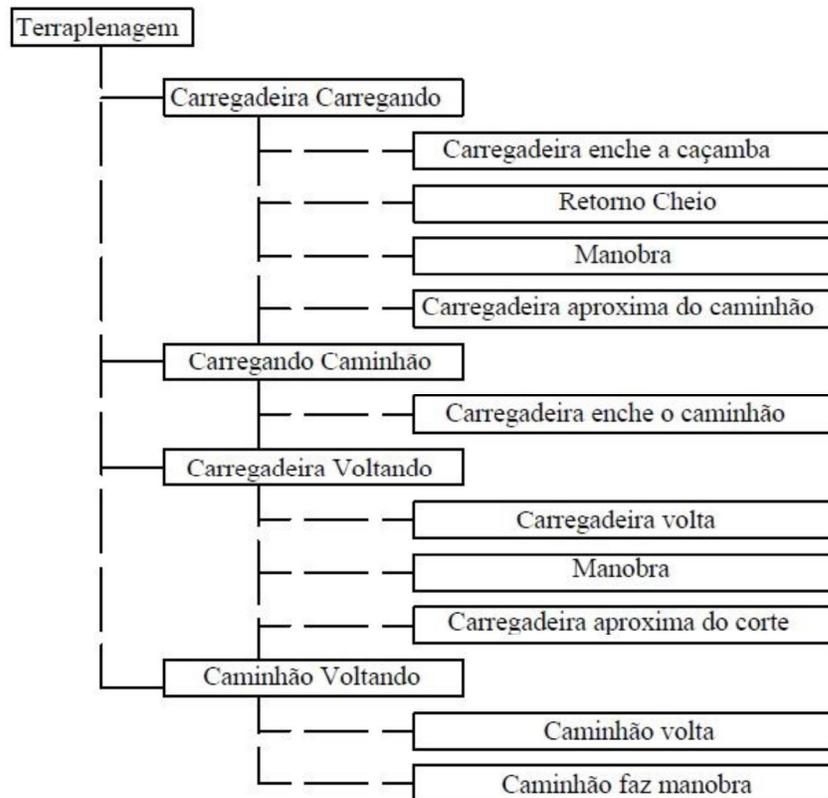
Figura 12 - Sub-modelo: Caminhão Voltando



Fonte: Criado pelo autor

Um conjunto de cores e suas respectivas variáveis foram criadas de acordo com a lógica do modelo. A Tabela 6 resume todas as cores utilizadas, suas respectivas variáveis e sua utilização no modelo. O Apêndice A resume o código usado para definir as cores, variáveis e constantes usadas no modelo. Foram criadas funções que controlam o disparo de transições, a retirada e disposição de fichas em lugares de acordo com a lógica de funcionamento operações de terraplenagem. Tais funções serão descritas a seguir e ilustradas no Apêndice B. A função *Escava* subtrai do valor da ficha no lugar *Corte*, a capacidade da caçamba da carregadeira considerando a porcentagem de empolamento definida anteriormente. A função *CarreCarr* também realiza cálculos do empolamento do solo, mas também é responsável por adicionar uma ficha da cor *Carregadeira* no lugar *L1*, dando sequência ao movimento do equipamento, e estabelecer o volume de terra na caçamba da carregadeira, considerando o final da escavação quando o material para escavar é menor do que a capacidade da caçamba do equipamento.

Figura 13 - Hierarquia do modelo



Fonte: Criado pelo autor

A função *disp_CarreCam* é uma função de guarda que verifica o carregamento do caminhão e desabilita a transição *Carregar Caminhão* se o volume de material na caçamba do caminhão for maior ou igual à capacidade do mesmo e menor do que a sua capacidade coroadada ou se não tiver nenhum caminhão sendo carregado e nem na fila de espera e habilita-a se o caminhão ainda não estiver cheio. *CarreCam*, *CarreCam_1* e *CarreCam_2*, são funções nos arcos de saída da transição *Carregar Caminhão* para os lugares *Caminhão Carregando*, *L42* e *L52*, respetivamente. A primeira adiciona uma ficha da cor *L_Caminhão* ao lugar *Caminhão Carregando* e soma o volume da caçamba da carregadeira ao volume da caçamba do caminhão, tendo em conta o coramento do último. A segunda adiciona uma ficha do tipo *Carregadeira* no lugar *L42* caso o coramento da caçamba do caminhão for atingido sem que o volume na caçamba da carregadeira seja todo utilizado, considerando a diferença de volume que sobra para ser colocado noutro caminhão. Caso contrário nenhuma ficha será adicionada. Por último a função *CarreCam_2* faz o contrário da função *CarreCam_1* só que em relação ao lugar *L52*.

Tabela 6 - Conjunto de cores usadas no modelo, suas variáveis e lugares associados

Cores	Lugares associados	Variáveis
cap_cam	-	vr_capcam
cap_cam2	-	vr_capcam2
exp_cam	-	vr_expcam
sit_corte	-	vr_sitcorte
cap_arr	-	vr_capcarr
exp_carr	-	vr_expcarr
sit_corte1	-	vr_sitcorte1
ordem	-	ordem
CORTE	CORTES	(vr_corte)
ATERRO	ATERROS	(vr_aterro)
	CAMINHÕES	
CAMINHAO	OCIOSOS, L8, L82, L9, L10, L104, L11	(vr_capcam, vr_expcam, vr_sitcorte, ordem)
L_CAMINHAO	CARREGANDO CAMINHAO	vr_lcam
	CARREGADEIRA	
CARREGADEIRA	OCIOSA, L1, L2, L3, L41, L2, L42, L52, L5, L53, L6, L7	(vr_capcarr, vr_expcarr, vr_sitcorte)

Fonte: Criado pelo autor

A transição *Liberar caminhão* tem uma função de guarda chamada *disp_LibCam* que a habilita quando o caminhão estiver em condições de transportar o material e a mantém desabilitada se o caminhão não estiver cheio. Sendo ela habilitada a função *LibCam* adiciona uma ficha da cor *Caminhão* no lugar *L82* com o seu devido volume de material a ser transportado.

Para a computação do tempo de operação do modelo foram criadas funções Funções de distribuições de probabilidade atachadas a cada transição. A escolha das distribuições para as transições foram baseadas em Marzouk (2002), que faz uma suposição considerando que esta não traz limitações ao modelo e que o usuário poderia escolher distribuições mais apropriadas. Em sua tese ele considera a distribuição triangular para o carregamento da caçamba do caminhão e para o transporte e uma distribuição uniforme para o descarregamento. Para as demais transições foi escolhida a distribuição exponencial de acordo com as considerações

feitas por Prata et al (2008). Os parâmetros das distribuições, os tempos para disparo de cada transição, foram considerados de acordo com o método apresentado por Ricardo e Catalani (2007) sendo que o tempo das transições *Transportando* e *Caminhão Voltando* variam de acordo com a distância de transporte e a velocidade do caminhão. No caso da distribuição triangular e uniforme foi considerado a média dada por Ricardo e Catalani (2007) mais ou menos um desvio padrão (Média/4) para encontrar os outros parâmetros da distribuição. Considera-se que essa suposição não é grotesca e que não afetará negativamente a temporização do modelo. Abaixo podem ser vistas os códigos das distribuições usadas.

```

fun TRIANGULAR (A: real, C: real, B: real) =
let
  val F = (C-A) / (B-A)
  val U = uniform (0.0,1.0)
in
  if U <= F
  then (A + Math.sqrt (U*(B-A)*(C-A)))
  else (B - Math.sqrt ((1.0-U)*(B-A)*(B-C)))
end;

```

(6)

```

fun EXPONENTIAL ((mean):real) = exponential(1.0/mean);

```

(7)

```

uniform (58.4, 97.5)

```

(8)

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Dados

Terminado o modelo procedeu-se com a aquisição e entrada de dados para simulação. Os dados se resumem em dados dos equipamentos, da pista de transporte, de tempo e do material a ser escavado. Como estudo de caso escolheu-se uma obra de construção da rodovia PE-099, trecho: BR-101 (Xexéu) com 121.043,66 m³ de terra para ser movimentada. A princípio foi considerado só um trecho da rodovia para ser modelado, o que corresponde a um volume de 54.142,02 m³ de terra. Considerou-se que o solo a ser escavado seria uma terra seca com as seguintes características: Densidade de 1,51 t/m³, porcentagem de empolamento de 25%, e afundamento de 1,6 cm. A distância média de transporte do centróide dos cortes até o centróide dos aterros é de 4,25 Km e para a pista de rolamento foi considerado o mesmo material dos cortes, ou seja, com afundamento de 1,6 cm.

Para a escolha de equipamentos consultou-se os catálogos da Caterpillar, que sugerem, para cada caminhão, o tipo de carregadeira que mais se adequa de acordo com o número de caçambadas para realizar uma operação de enchimento. Foi escolhido um caminhão “off-road” de modelo 770G com as seguintes características: Capacidade física da caçamba de 17,6 m³, capacidade coroada de 25,2 m³ (fator de coroamento de 1,43), 71,2 toneladas de peso, Potência líquida de 384Kw, velocidade de ida e volta de 54,5 m/s e 73,7 m/s, espetivamente. A velocidade do caminhão sofre várias variações durante a ida e a volta devido a mudanças de marcha, comprimento do trecho de transporte, relação peso/potência, condições desfavoráveis da pista e do operador. Por isso foi considerado um fator de redução de velocidade de acordo com Ricardo e Catalani (2007). Esse fator depende de um parâmetro r que é igual à relação peso/potência do equipamento e foi calculado utilizando os dados do caminhão escolhido para a obra. Fez-se o peso do caminhão (7120 kg) mais o peso do material na caçamba (1510*25,2) e dividiu-se pela potência do caminhão resultando num r de 198,29 kg/cv na ida. E na volta do caminhão o r foi de 136,4 kg/cv. O fator de redução de velocidade foi definido de acordo com parâmetro r na tabela disponível em Ricardo e Catalani (2007), sendo de 0,92 para ambos casos. De acordo com as carregadeiras sugeridas pelo catálogo da Caterpillar escolheu-se uma carregadeira CAT950 com as seguintes características: Capacidade física da caçamba de 3,49 m³, 18,5 toneladas de peso, Potência líquida de 161Kw.

Os tempo de disparo das transições foram definidos de acordo com Ricardo e Catalani (2007) e estão listados na Tabela 7. Esses tempos podem ser afetados por um fator de

correção do operador do equipamento que de acordo com Ricardo e Catalani (2007) pode ser classificado como excelente, regular e fraco tendo, respetivamente, os seguintes valores: 1, 0,75 e 0,6 . Para a primeira análise foi considerado que todos os operadores possuem experiência.

Tabela 7 - Transições do modelo e suas distribuições de disparo

Transição	Distribuição
Carregar Caçamba	Exponencial (6,0)
Retorno Cheio	Exponencial (2,16)
Manobra_i	Exponencial (1,85)
Avanço	Exponencial (4,0)
Carregar Caminhão	Triangular (3,15; 4,2; 5,25)
Retorno Vazio	Exponencial (3,0)
Manobra_v	Exponencial (1,85)
Avanço ao Corte	Exponencial (2,16)
Transportando	-
Descarregando	Uniforme (58,4 ;97,5)
Caminhão Voltando	-
Manobra_c	Exponencial (18,0)

Fonte: Criado pelo autor

4.2 Replicações

Para analisar o comportamento das equipes produtivas no que diz respeito a relação entre o número de carregadeiras e o número de caminhões e sua relação com o tempo de operação e o custo de execução, foram feitas replicações do modelo para obtenção dos resultados. Por conta da variabilidade do tempo de operação devido à estocasticidade do modelo, as replicações são mais concisas do que simulações isoladas pois permitem a obtenção de diversos valores dos quais a média aritmética é escolhida como representativa. Foram feitas 5 replicações para cada equipe de produção em que se variou o número de carregadeira de 1 até 5 e o número de caminhões de 1 até 32, gerando 160 equipes diferentes. Cada equipe gera um tempo de simulação específico e por conseguinte um custo diferente. Os dados concernentes ao custo de operação dos equipamentos foram adquiridos através do sistema de custos do Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte (DNIT), datados de 2014. A Tabela 8 resume o tempo de operação e o custo das equipes simuladas.

Tabela 8 - Resumo das equipes modeladas - Continua

Equipe	Número de carregadeiras	Número de Caminhões	Tempo médio de operação (h)	Custo unitário (R\$/h)	Custo total (R\$)
1	1	1	1072,70	700,72	805.295,95
2	1	2	540,47	1201,08	703.191,63
3	1	3	363,15	1701,44	672.355,82
4	1	4	275,05	2201,80	660.622,19
5	1	5	223,01	2702,16	658.370,87
6	1	6	189,95	3202,52	665.303,46
7	1	7	171,86	3702,88	696.539,35
8	1	8	168,28	4203,24	774.653,82
9	1	9	168,25	4703,60	867.097,06
10	1	10	168,34	5203,96	960.193,38
11	1	11	168,34	5704,32	1.052.839,89
12	1	12	168,34	6204,68	1.145.486,41
13	1	13	168,34	6705,04	1.238.132,93
14	1	14	168,34	7205,40	1.330.779,44
15	1	15	168,20	7705,76	1.422.257,28
16	1	16	168,20	8206,12	1.514.827,73
17	1	17	168,20	8706,48	1.607.398,18
18	1	18	168,20	9206,84	1.699.968,64
19	1	19	168,20	9707,20	1.792.539,09
20	1	20	168,20	10207,56	1.885.109,54
21	1	21	168,20	10707,92	1.977.679,99
22	1	22	168,20	11208,28	2.070.250,44
23	1	23	168,20	11708,64	2.162.820,89
24	1	24	168,20	12209,00	2.255.391,34
25	1	25	168,20	12709,36	2.347.961,79
26	1	26	168,20	13209,72	2.440.532,24
27	1	27	168,20	13710,08	2.533.102,70
28	1	28	168,20	14210,44	2.625.673,15
29	1	29	168,20	14710,80	2.718.243,60
30	1	30	168,20	15211,16	2.810.814,05
31	1	31	168,20	15711,52	2.903.384,50
32	1	32	168,20	16211,88	2.995.954,95
33	2	1	980,93	901,08	932.944,11
34	2	2	493,79	1401,44	741.399,05
35	2	3	331,33	1901,80	679.822,81
36	2	4	250,29	2402,16	651.284,49
37	2	5	201,63	2902,52	635.634,90
38	2	6	169,39	3402,88	627.232,14
39	2	7	146,30	3903,24	622.269,40

Tabela 8 - Resumo das equipes modeladas - Continuação

Equipe	Número de carregadeiras	Número de Caminhões	Tempo médio de operação (h)	Custo unitário (R\$/h)	Custo total (R\$)
40	2	8	129,21	4403,60	620.680,24
41	2	9	115,86	4903,96	620.320,04
42	2	10	105,43	5404,32	622.489,86
43	2	11	97,26	5904,68	627.795,92
44	2	12	91,06	6405,04	637.843,94
45	2	13	87,44	6905,40	660.614,90
46	2	14	86,43	7405,76	700.603,92
47	2	15	86,38	7906,12	747.752,40
48	2	16	86,38	8406,48	795.294,83
49	2	17	86,38	8906,84	842.837,27
50	2	18	86,38	9407,20	890.379,70
51	2	19	86,38	9907,56	937.922,13
52	2	20	86,38	10407,92	985.464,57
53	2	21	86,38	10908,28	1.033.007,00
54	2	22	86,38	11408,64	1.080.549,44
55	2	23	86,38	11909,00	1.128.091,87
56	2	24	86,38	12409,36	1.175.634,30
57	2	25	86,38	12909,72	1.223.176,74
58	2	26	86,38	13410,08	1.270.719,17
59	2	27	86,38	13910,44	1.318.261,60
60	2	28	86,38	14410,80	1.365.804,04
61	2	29	86,38	14911,16	1.413.346,47
62	2	30	86,38	15411,52	1.460.888,91
63	2	31	86,38	15911,88	1.508.431,34
64	2	32	86,38	16412,24	1.555.973,77
65	3	1	950,13	1101,44	1.094.018,18
66	3	2	477,95	1601,80	813.375,97
67	3	3	320,64	2102,16	722.134,47
68	3	4	241,94	2602,52	678.052,37
69	3	5	194,71	3102,88	652.825,63
70	3	6	163,28	3603,24	637.316,30
71	3	7	140,91	4103,60	627.556,52
72	3	8	124,07	4603,96	620.835,05
73	3	9	111,04	5104,32	616.742,93
74	3	10	100,52	5604,68	613.644,57
75	3	11	92,16	6105,04	613.360,38
76	3	12	85,08	6605,40	613.063,78
77	3	13	79,07	7105,76	613.244,00
78	3	14	74,12	7606,12	615.608,80
79	3	15	69,82	8106,48	618.378,36

Tabela 8 - Resumo das equipes modeladas - Continuação

Equipe	Número de carregadeiras	Número de Caminhões	Tempo médio de operação (h)	Custo unitário (R\$/h)	Custo total (R\$)
80	3	16	66,19	8606,84	622.625,36
81	3	17	63,14	9107,20	628.738,05
82	3	18	60,86	9607,56	639.453,97
83	3	19	59,55	10107,92	658.474,16
84	3	20	59,18	10608,28	686.941,42
85	3	21	59,16	11108,64	719.252,41
86	3	22	59,02	11609,00	750.120,79
87	3	23	59,02	12109,36	782.604,58
88	3	24	59,02	12609,72	815.088,37
89	3	25	59,02	13110,08	847.572,16
90	3	26	59,02	13610,44	880.055,95
91	3	27	59,02	14110,80	912.539,74
92	3	28	59,02	14611,16	945.023,53
93	3	29	59,02	15111,52	977.507,32
94	3	30	59,02	15611,88	1.009.991,11
95	3	31	59,02	16112,24	1.042.474,90
96	3	32	59,02	16612,60	1.074.958,69
97	4	1	937,16	1301,80	1.266.849,34
98	4	2	471,15	1802,16	896.194,72
99	4	3	315,90	2302,52	774.754,23
100	4	4	238,17	2802,88	715.195,22
101	4	5	191,70	3303,24	681.169,74
102	4	6	160,65	3803,60	659.243,55
103	4	7	138,58	4303,96	644.965,93
104	4	8	121,90	4804,32	634.421,38
105	4	9	109,03	5304,68	627.425,84
106	4	10	98,66	5805,04	622.080,11
107	4	11	90,24	6305,40	618.601,36
108	4	12	83,20	6805,76	616.164,54
109	4	13	77,31	7306,12	615.072,81
110	4	14	72,20	7806,48	614.151,04
111	4	15	67,78	8306,84	613.898,45
112	4	16	63,97	8807,20	614.553,80
113	4	17	60,70	9307,56	616.546,06
114	4	18	57,70	9807,92	617.802,75
115	4	19	55,04	10308,28	619.659,89
116	4	20	50,66	10808,64	598.187,27
117	4	21	48,83	11309,00	603.451,04
118	4	22	47,38	11809,36	611.607,23
119	4	23	46,29	12309,72	623.008,97
120	4	24	45,67	12810,08	639.820,55

Tabela 8 - Resumo das equipes modeladas - Conclusão

Equipe	Número de carregadeiras	Número de Caminhões	Tempo médio de operação (h)	Custo unitário (R\$/h)	Custo total (R\$)
121	4	25	45,52	13310,44	662.768,75
122	4	26	45,52	13810,80	687.820,29
123	4	27	45,50	14311,16	712.519,10
124	4	28	45,49	14811,52	737.436,54
125	4	29	45,48	15311,88	762.282,79
126	4	30	45,47	15812,24	787.116,64
127	4	31	45,45	16312,60	811.938,10
128	4	32	45,44	16812,96	836.747,17
129	5	1	928,05	1502,16	1.440.479,35
130	5	2	467,03	2002,52	981.944,71
131	5	3	312,93	2502,88	830.157,45
132	5	4	236,08	3003,24	756.214,98
133	5	5	189,85	3503,60	712.611,66
134	5	6	159,01	4003,96	684.366,69
135	5	7	137,06	4504,32	665.312,24
136	5	8	120,72	5004,68	652.436,98
137	5	9	107,81	5505,04	642.037,21
138	5	10	97,56	6005,40	634.691,02
139	5	11	89,19	6505,76	629.301,85
140	5	12	82,15	7006,12	624.851,73
141	5	13	76,30	7506,48	622.308,95
142	5	14	71,26	8006,84	620.488,63
143	5	15	66,81	8507,20	618.491,24
144	5	16	63,03	9007,56	618.196,83
145	5	17	59,67	9507,92	618.099,70
146	5	18	56,71	10008,28	618.577,05
147	5	19	54,04	10508,64	619.201,68
148	5	20	51,71	11009,00	620.925,82
149	5	21	49,46	11509,36	621.231,06
150	5	22	47,52	12009,72	622.911,41
151	5	23	45,73	12510,08	624.633,56
152	5	24	44,13	13010,44	627.062,78
153	5	25	42,65	13510,80	629.616,63
154	5	26	41,36	14011,16	633.235,70
155	5	27	40,16	14511,52	637.019,99
156	5	28	39,11	15011,88	641.934,42
157	5	29	38,25	15512,24	648.774,97
158	5	30	37,69	16012,60	660.105,80
159	5	31	37,41	16512,96	675.670,90
160	5	32	37,29	17013,32	694.051,78

Fonte: Criado pelo autor

Através das informações da Tabela 8, foram construídos gráficos que ilustram de uma melhor forma a relação existente entre a quantidade de equipamento com o tempo de operação e com o custo total. A Figura 14 apresenta o comportamento do tempo de ciclo das operações em relação à variação da quantidade de carregadeiras e de caminhões, enquanto que a Figura 15 tal relação é concernente ao custo total de operação. O gráfico da Figura 14 é apresentado de forma ampliada mas a sua versão completa pode ser vista no Apêndice C.

Analisando o gráfico da Figura 14 percebe-se um comportamento já esperado. Analisando pela ótica da carregadeira o tempo de ciclo vai diminuindo à medida que se aumenta o número de caminhões, pois estes contribuem para o aumento da produção sincronizada da equipe. Enquanto um caminhão vai transportando o material, outro está sendo carregado pela carregadeira e assim por diante. À medida que o número de caminhões vai aumentando o tempo ocioso da carregadeira vai diminuindo até o ponto em que não há nenhuma diminuição do tempo. Nesse momento o tempo de ciclo se mantém constante porque a carregadeira está trabalhando na sua produção máxima sem tempo ocioso, o que significa que aumentar o número de caminhões seria apenas aumento de custo. Pode-se ver esse comportamento para as cinco curvas, sendo que a diferença é que o ponto em que há uma constância no tempo de ciclo é diferente. Como ao aumentar o número de carregadeiras aumenta-se a produção, vai ser necessário mais caminhões para esgotar a produção da equipe de carregadeiras. Apartir de uma carregadeira, a quantidade de caminhões para a produção máxima varia entre 5 e 6, como pode ser visto na Tabela 9.

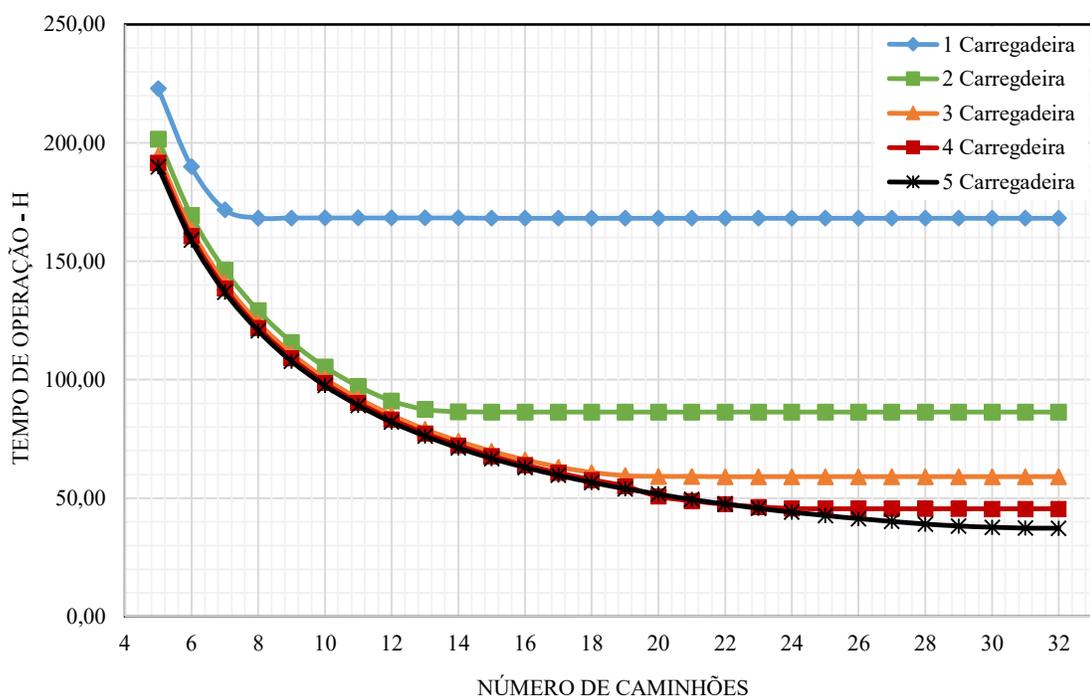
Tabela 9 - Número de caminhões atendidos pelas carregadeiras

Nº de Carregadeiras	Nº de Caminhões para produção máxima	Acréscimo de caminhões atendidos
1	8	
2	14	6
3	20	6
4	25	5
5	30	5

Fonte: Criado pelo autor

Notou-se também que a diminuição do tempo de ciclo para o mesmo número de caminhões é pequena a princípio e isso se deve ao fato de que os caminhões é que estão controlando a produção para números pequenos de dos mesmos. Quando a carregadeira passa a controlar a produção, essa diferença acentua-se. Os três primeiros pontos da primeira curva estão próximos dos três primeiros pontos da segunda curva, mas a partir do quarto ponto há um distanciamento, pois a a equipe de uma carregadeira atingiu sua produção máxima e a equipe de duas carregadeira consegue ainda atender mais caminhões. Essa relação é mais acentuada a partir de duas carregadeiras, como visto no gráfico da Figura 14. As demais curvas parecem se sobrepôr a princípio mas se separam nos pontos de produção máxima de cada equipe.

Figura 14 - Variação do tempo com o número de caminhões e carregadeiras

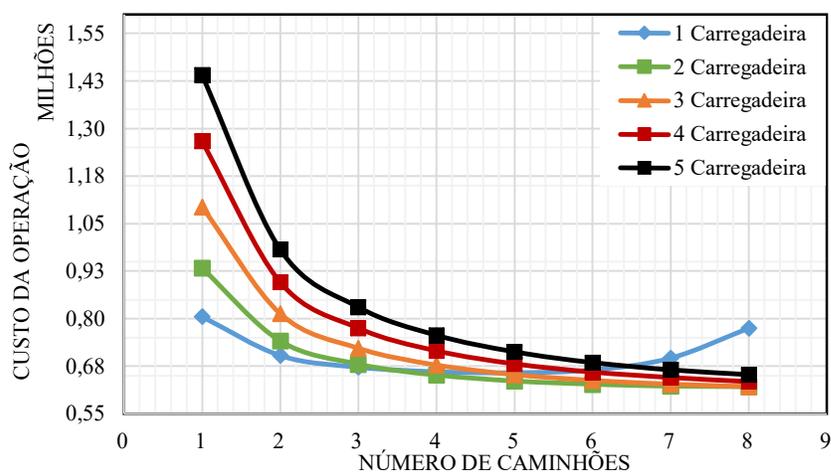


Fonte: Criado pelo autor

A Figura 15 também apresenta um comportamento esperado. Nota-se que a princípio o custo segue uma ordem inversa das equipes. Enquanto que para o tempo de ciclo havia uma diminuição com o aumento de carregadeiras, para o custo de operação há um aumento. Para um caminhão a equipe mais cara é a de cinco carregadeiras, seguindo pela de quatro e assim sucessivamente. Há medida que o número de caminhões vai aumentando, o custo

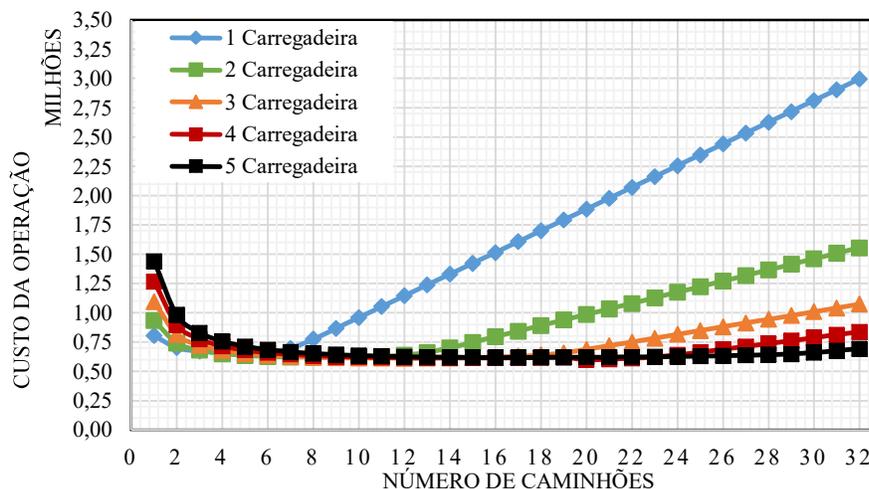
vai diminuindo por conta do decréscimo do tempo de ciclo. Como o aluguel dos equipamentos é feito à hora, é natural que haja um decréscimo no custo de diminuirmos o tempo de ciclo. Mas esse decréscimo se dá até um certo ponto em que o custo dos equipamentos começa a tornar a operação mais cara, se acentuando quando o tempo de ciclo se mantém constante. No gráfico da Figura 16 o padrão inicial se inverte, pois houve um aumento do número de equipamentos aceretando em custos elevados. Verifica-se que apartir de um certo ponto não adianta aumentar o número de caminhões.

Figura 15 – Variação do custo como o número de caminhões e carregadeiras



Fonte: Criado pelo autor

Figura 16 - Variação do custo com o número de caminhões e carregadeiras



Fonte: Criado pelo autor

4.3 Comparação com o método tradicional de dimensionamento

Para a comparação dos resultados obtidos com o método tradicional de dimensionamento de equipes mecânicas para a realização de terraplenagem, usado na prática, calculou-se o número de caminhões que uma carregadeira pode atender, usando o método já citado. Os cálculos realizados geraram uma equipe de uma carregadeira e cinco caminhões, como pode ser visto no Apêndice D, o que representa a equipe 5 modelada.

Como pode ser visto na Tabela 10, a equipe 5, calculada pelo método tradicional, realizou movimentação de terra em mais de nove dias, enquanto que a equipe 160 terminou a operação em um dia e meio o que representa 17% do tempo da equipe 5. Nota-se que a equipe 5 é composta de 1 carregadeira e 5 caminhões enquanto a equipe 160 por 5 carregadeiras e 32 caminhões, o que explica a diferença acentuada no tempo, pois aliada ao fato de que a produção da carregadeira é quintuplicada, o elevado número de caminhões permite que elas trabalhem sem tempo ocioso. Desta forma a produção dessa equipe é maximizada, diminuindo o tempo de operação em 83%.

Pela ótica do custo operação pode-se ver que a equipe 160 foi mais cara do que a equipe 5, pois a diminuição do tempo de operação é feita às custas de um aumento do número de equipamentos. Esse aumento é proveitoso até o ponto em que a produção da carregadeira é maximizada, pois a partir daí o aumento do número de caminhões só gera custos.

Tabela 10 - Comparação das melhores equipes com o método tradicional

Otimização	Carregadeira CAT950	Caminhão 770G	Tempo (dias)	Desvio	Custo (R\$)	Desvio
Tempo mínimo (160)	5	32	1,55	- 83,3%	694.051,78	5,4%
Custo mínimo (116)	4	20	2,11	- 77,3%	598.187,27	-9,14%
Método tradicional (5)	1	5	9,29		658.370,87	

Fonte: Criado pelo autor

A equipe 116 foi a mais econômica de todas as simuladas. Apresentou um desvio de 9,1% em relação à equipe 5, o que representa uma economia bem significativa quando se trata

de valores da dos milhares. Escolher a equipe 116 em detrimento da 5 significa reduzir o custo da obra em R\$ 60.183,60. Esta mesma equipe também é melhor do que a 5 se busca-se uma redução nos prazos, pois o seu tempo de operação desvia-se da última em 77,3%.

Na tomada de decisão vários fatores pode ser considerados e cada empreiteiro analisa o que é prioridade em cada situação. Algumas obras têm prazos restritos a seres cumpridos e nestes casos recomenda-se que a equipe 160 seja utilizada pois é mais eficiente na questão do tempo. Mas se a execução de determinado projeto não for restringida por curtos prazos, recomenda-se que sejam escolhidas equipes mais eficiente em relação aos custos, o que no caso apresentado significaria trabalhar com 4 carregadeiras e 20 caminhões.

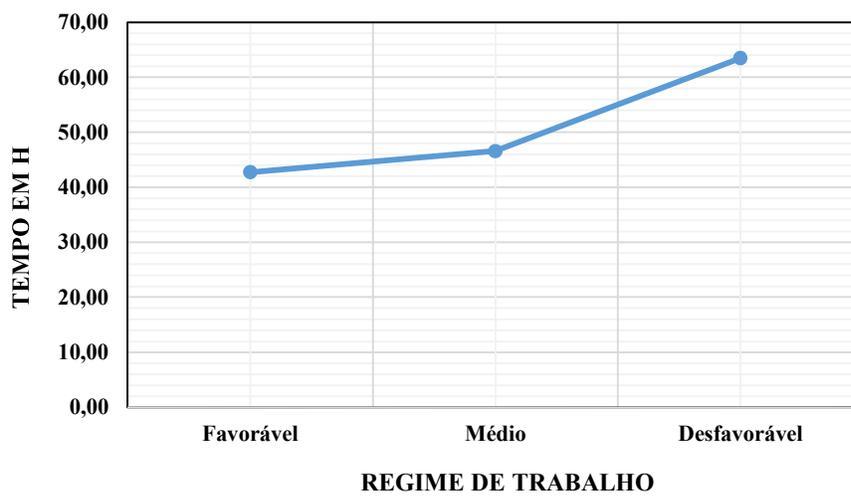
4.4 Análise do comportamento do modelo

Para analisar mais afundo o comportamento do modelo em questão, alguns parametros do modelo forma variados e comparados para melhor entendimento das operações de terraplenagem e para o auxílio na tomada de decisões. Foi escolhida equipe 116, que é cmposta por 4 carregadeiras e 20 caminhões, para a realização das replicações. As seções a seguir discutem o comportamento do modelo em relação regime de trabalho, uso do fator de velocidades, coroamento da caçamba do caminhão e o uso do fator de correção do operador.

4.4.1 Regime de trabalho

Segundo Ricardo e Catalani (2007) o regime de trabalho nas operações de terraplenagem pode ser classificado em favorável, médio ou desfavorável. A consideração do regime de trabalho vai afetar os tempos de duração de cada movimento realizado pela carregadeira e os tempo de manobra-descarda e manobra-posicionamento do caminhão. Os parâmetros de tempo utilizados nas distribuições em cada tipo de regime estão tabelados no Apêndice E. O gráfico da Figura 17 ilustra a variação do tempo de acordo com o regime de trabalho.

Figura 17 - Variação do tempo com o regime de trabalho



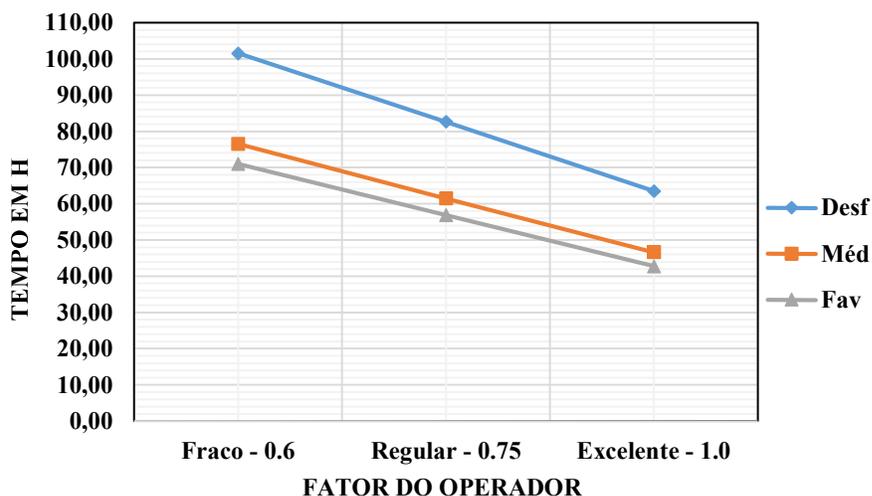
Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se um comportamento já esperado, pois há um aumento no tempo de operação à medida que o regime de trabalho se agrava. No regime desfavorável a obra seria terminada em mais tempo do que no regime médio e neste a movimentação de terras demoraria mais do que no regime favorável. As condições de trabalho afetam o curso da obra e cabe aos engenheiros e empreiteiros tomarem medidas que diminuam impactos negativos no prazo de entrega estabelecido em projeto. A próxima seção abordará uma das soluções a esse problema.

4.4.2 Fator de correção do operador

O fator de correção do operador é classificado como fraco, regular ou excelente, de acordo com Ricardo e Catalani (2007). Esse fator também afeta diretamente a computação dos tempos de operação dos equipamentos através dos seguintes coeficientes de correção: 0,6 para operador fraco, 0,75 para operador regular e 1,0 para operador excelente. O gráfico da Figura 18 mostra a variação do tempo de operação em função do fator de correção do operador e do regime de trabalho.

Figura 18 - Variação do tempo com o fator de operador



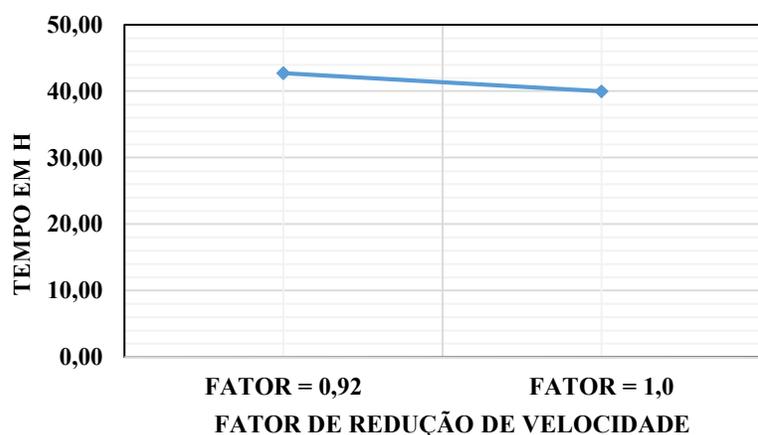
Fonte: Elaborado pelo autor

Como esperado, o tempo de operação é sempre maior para o regime desfavorável, independentemente do fator de correção do operador, e há uma tendência decrescente à medida que as condições de trabalho são melhoradas. Mas nota-se que com operadores excelentes, os tempos de operação em regime desfavorável são menores que do que os tempo de operação com operadores regulares em regime médio e do que operadores fracos em regime favorável. Apesar de trabalhar em regime desfavorável um operador com muita experiência consegue minimizar as dificuldades trazidas pelas más condições de operação. Da forma contrária, um operador que não tem experiência, mesmo em condições favoráveis, não tráz muita vantagem. Em condições de trabalho adversas vale optar por operadores mais experiêntes. Outra análise interessante que poderia ter sido feita é compararo efeito do fator de correção de operadores com o custo decorrente do salário dos memos. Um operador excelente realizaria uma operação em menos tempo mas representaria um cuso horário mais elevado e de forma inversa um operador sem experiência, apesar de ser menos eficiente em relação ao tempo, tem uma mão de obra mais barata, tornando-o atrativo dependendo do caso.

4.4.3 *Uso do fator de redução de velocidades*

O efeito do fator de redução de velocidade foi representado e pode ser visualizado na Figura 19 e como se esperava o tempo de operação é maior quando é considerado. O método de dimensionamento de equipes de terraplenagem não considera este fator, o que significa que não são consideradas as variações de velocidade no trajeto de ida e de volta do caminhão. Com essa aproximação, também se considera que o caminhão começa e termina cada trecho a mesma velocidade, o que não acontece na prática, pois o caminhão parte de uma velocidade inicial igual a zero, depois a esta é aumentada até atingir uma constância e finalmente há desaceleração perto do fim do trecho.

Figura 19 - Variação do tempo com o fator redução de velocidade



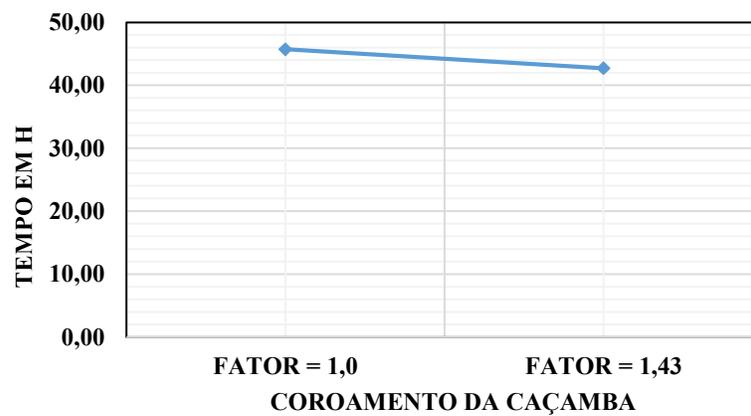
Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.4 *Coroamento da caçamba do caminhão*

O aproveitamento do coroamento da caçamba caminhão também apresenta benefícios para a produção horária dos equipamentos. A Figura 20 resume a variação do tempo de operação com o aproveitamento do volume coroado dos caminhões. Apesar do aproveitamento do volume coroado do caminhão significar que a carregadeira tem que fazer um ou mais ciclos a mais do que o normal, isso não representa uma desvantagem pois o tempo de ciclo da carregadeira não vai afetar tanto o tempo de operação como o tempo de ciclo do caminhão. Então é melhor realizar mais um ciclo com a carregadeira, para que o momento de

transporte do caminhão seja maior, do que tentar ganhar tempo ao liberar o caminhão apenas com seu volume físico para se proceder imediatamente a carga de um outro caminhão.

Figura 20 - Variação do tempo com o coroamento do caminhão



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÃO

Um modelo de redes de Petri coloridas foi criado para modelar as operações de terraplenagem e simular o comportamento de diversas configurações de equipamentos e respectivos impactos no custo e nos prazos de projeto. A rede de Petri colorida é uma linguagem de modelagem e simulação gráfica que contém uma linguagem matemática robusta e possibilita o desenvolvimento de modelos robustos que auxiliem na tomada de decisão. As lógicas das operações de terraplenagem não fogem a essa regra e foram modeladas através do uso do CPNTools 4.0.1 possibilitando a possíveis usuários, não tão familiarizados com a estrutura matemática da teoria das redes de Petri, certa facilidade na introdução de dados e no processo de simulação.

O método de dimensionamento de equipamentos para terraplenagem, usado na prática, contém algumas limitações que inviabilizam o seu uso em obra de grande porte, como:

- Não considera a estocasticidade envolvida com as operações de terraplenagem. A computação da duração de cada movimentação realizada pelos equipamentos não tem natureza determinística, como o método considera, pois vários fatores contribuem para que haja uma variação na duração de cada serviço;
- Limita-se a buscar uma configuração de equipamentos que se baseia na produção de uma carregadeira e não possibilita o estudo de outras prováveis configurações. Desta forma a tomada de decisão pode ser baseada em equipes que não minimizam os tempos de operação ou os custos envolvidos nas obras;
- Não considera fatores de correção que afetam o tempo de operação como o de redução de velocidade, o de operadores e o de regime de trabalho. Estes fatores são importantes pois representam matematicamente a natureza das operações envolvidas na terraplenagem, relevantes para a computação dos tempos;

No processo de modelagem buscou-se ultrapassar tais limitações e o resultado foi considerado satisfatório, pois foi possível avaliar a estocasticidade das operações de movimentação de terra, analisar várias configurações de equipamentos e estudar a influência dos fatores mencionados em todo o processo de terraplenagem. Desta forma o modelo representa uma alternativa viável ao uso do método de dimensionamento apresentado.

Foi avaliada a relação entre o custo de terraplenagem e a seleção de equipamentos, tendo-se chegado à conclusão de que o modelo proporciona boas condições de tomada de

decisão. Foram avaliadas várias configurações de equipamentos e escolhidas as que minimizam os custo e tempo de operação. Ambos foram melhores do que a equipe proposta através do método tradicional.

Apesar do modelo apresentar soluções na seleção de equipamentos, algumas limitações e propostas de melhoria podem ser apresentadas.

- Toda a complexidade das operações de terraplenagem não foi modelada. Sugere-se que um modelo mais robusto seja criado para considerar características das operações de terraplenagem que não foram consideradas. Uma consideração pertinente seria a abranger o modelo para o uso de mais equipamentos;
- A entrada de dados precisa ser mais facilitada para os usuários. Propõem-se a criação de uma interface de entrada de dados que gere arquivos de marcações do modelo em .txt;
- Existe a possibilidade de encontrar uma equipe que se adequa melhor às condições da obra, através da variação das configurações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOURISK, Simaan. **Role of Simulation in Construction Engineering and Management**. Journal of Constructions Engineering and management. vol. 36. 10. 2010.
- BANKS, Jerry. **Discrete event simulation**. Proceedings of the 1999 Winter Simulations Conference. 1999.
- CARDOSO, J.; VALETTE, R. **Redes de Petri**. Editora UFSC. Florianopolis. 1997.
- CHENG, F.F.; Y.W., WANG, X.Z; LING, Y. BAI. **A Petri net simulation model for virtual construction of earthmoving operations**. Automation in Construction. 20. 2. 181–188. 2011.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: Teoria e aplicações**, 2ª Ed. Bravarte, 2007.
- DESROCHERS, A.A.; AI-JAAR, R.Y. **Applications of Petri nets in manufacturing systems**. IEEE Press. United States of America. 1995.
- FEI-YUE, Wang. **Agent-Based Control for fuzzy Behavior programming in Robotic Excavation**. IEEE Transactions on fuzzy systems. vol 20. no. 4. 2004.
- HALPIN, D. W.; WOODHEAD, R. W. **Design of construction and process operations**. Wiley. New York. 1976.
- JENSEN, K. **Coloured Petri nets: basic concepts. analysis methods and practical use – Volume 1: basic concepts**. Springer-Verlag. Denmark. 1992.
- LIMA, R. X. **Logística da Distribuição de Materiais em Pavimentação Rodoviária: uma Modelagem em Programação Matemática**. Fortaleza. Dissertação (Mestrado) Programa de Engenharia de Transportes - PETRAN. Universidade Federal do Ceará. 2003.
- MARTINEZ, Júlio C. **EZSTROBE – General-purpose simulation system based on Activity Cycle Diagrams**. 2001 Winter Simulation Conference. 2001.
- MARZOUK, M. **“Optimizing earthmoving operations using computer simulation.”** PhD thesis. Concordia Univ.. Montréal. 2002.
- MARZOUK, M.; MOSELHI, O. **Optimizing earthmoving operation using object-oriented simulation**. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Orlando. USA. 2000.
- MARZOUK, M.; MOSELHI, O. **Object-oriented simulation model for earthmoving operations**. J. Constr. Eng. Manage.. 129 (2). 173–181. 2003.

MOSELHI, O.; ALSHIBANI, A. **Crew optimization in planning and control of earthmoving operation using spatial technologies.** Journal of Information Technology in Construction - ITcon. v. 12. 121 – 137. 2007.

NASSAR, Khaled; CASAVANT, Albert. **Analysis of timed Petri Nets for reachability in construction applications.** Journal of Civil Engineering and Management 14(3): 189-198. 2008.

PRATA, B.A.; NOBRE JÚNIOR, E.F.; BARROSO, G.C. **A stochastic colored petri net model to allocate equipments for earth moving operations.** Journal of Information Technology in Construction 13. 476–490. 2008.

RICARDO, H.S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação – Terraplangem e Escavação de Rocha.** 3ª Ed. Editora Pini. São Paulo. 2007.

SHANNON, R.E. **Systems simulation: the art and Science.** Prentice-Hall. New Jersey. 1975.

HENNEMANN, F.A. **Uma abordagem híbrida para sistemas de apoio à decisão utilizando redes de Petri e técnicas de simulação.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.

APÊNDICE A – LISTA DE CORES, VARIÁVEIS E CONTANTES USADAS NO MODELO

(* My Declarations *)

(* MARCACOES *)

(* CORTES *)

(* DECLARACOES *)

colset CORTE = real timed;

(* CONSTANTES *)

val vol_corte = 54142.02;

val e = 0.25 (*Empolamento*);

val a = 1.6 (*afundamento de pneus
em cm de acordo com tipo de solo
no transporte de carga pelo caminho*)

val me = 1.51 (*massa especifica
solta do material escavado em t/m3*)

(* VARIAVEIS *)

var vr_corte : CORTE;

(* CAMINHOS *)

(* DECLARACOES *)

colset cap_cam = real;

colset cap_cam2 = real;

colset exp_cam = real;

colset sit_corte = real ;

colset ordem = int;

colset CAMINHAO = product

cap_cam*exp_cam*sit_corte*ordem timed;

colset L_CAMINHAO = list CAMINHAO timed;

(* CONSTANTES *)

val vl_expcam = 1.0 (*Experiencia do operador*)

val qtd_cam = 16;

val vl_capcam = 17.6;

val No = 384.0

(*Potencia do caminhao em KW*)

val Pcam = 71.2

(*Peso do caminhao em tonelada*)

```

val coroa = 1.43 (*%coroamento*)
val Vi = 54.4; (*Km/h*)
val fi = 0.92;
(*fator de reducao de velocidade ida*)
val Vv = 76.3; (*Km/h*)
val fv = 0.92;
(*fator de reducao de velocidade volta*)
(* VARIAVEIS *)
var vr_capcam : cap_cam;
var vr_capcam2 : cap_cam2;
var vr_expcam : exp_cam;
var vr_lcam : L_CAMINHAO;
var vr_sitcorte : sit_corte;
var ordem : ordem;
(* ATERROS *)
(* DECLARACOES *)
colset ATERRO = real timed;
(* CONSTANTES *)
(* VARIAVEIS *)
var vr_aterro: ATERRO;
(* CARREGADEIRA *)
(* DECLARACOES *)
colset cap_carr = real;
colset exp_carr = real;
colset sit_corte1 = real;
colset CARREGADEIRA =product
cap_carr*exp_carr*sit_corte1 timed;
(* CONSTANTES *)
val vl_capcarr = 3.49;
val vl_expcarr = 1.0;
val qtd_carr = 1;
(* VARIAVEIS *)
var vr_capcarr : cap_carr;
var carregadeira: CARREGADEIRA;
var vr_expcarr : exp_carr;
var vr_sitcorte1 : sit_corte1;

```

(* PISTA *)

val DMT = 4.25; (*Km*)

APÊNDICE B – LISTA DE FUNÇÕES USADAS NO MODELO

(* FUNCOES *)

```

fun Escava (vr_corte) =
  if ((e+1.0)*vr_corte) > vl_capcarr then
    1^(vr_corte-(vl_capcarr/(e+1.0)))
  else 1^0.0;

```

```

fun CarreCarr (Cortes,Carregadeira)=
  let
    val (vr_capcarr,vr_expcarr,vr_sitcorte) = Carregadeira
    val vr_corte = Cortes
  in
    if vr_corte > vr_capcarr then
      1^(vr_capcarr,vr_expcarr,(vr_corte-(vl_capcarr/(e+1.0))))
    else 1^(vr_corte,vr_expcarr,0.0)
  end

```

```

fun CarreCam (fcaminhoes,lcaminhoes, carregadeira,L) =
  if lcaminhoes = nil then L
  else
    let
      val (vr_capcam1,vr_expcam1,vr_sitcorte3,ordem1) = fcaminhoes
      val (vr_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte2,ordem) = hd lcaminhoes
      val (vr_capcarr,vr_expcarr,vr_sitcorte1) = carregadeira
    in
      if (vr_capcam + vr_capcarr) <= (coroa*vl_capcam)
        then 1^(vr_capcarr+vr_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte1,ordem)
      else 1^(coroa*vl_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte1,ordem)
    end

```

```

fun CarreCam_1 (fcaminhoes,lcaminhoes, carregadeira) =
  if lcaminhoes = nil then empty
  else
    let
      val (vr_capcam1,vr_expcam1,vr_sitcorte1,ordem1) = fcaminhoes

```

```

    val (vr_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte,ordem) = hd lcaminhoes
    val (vr_capcarr,vr_expcarr,vr_sitcorte) = carregadeira
in
if (vr_capcam + vr_capcarr) <= (coroa*vl_capcam)
    then empty
else l`((vr_capcam + vr_capcarr) - (coroa*vl_capcam),vr_expcarr,vr_sitcorte)
end

fun CarreCam_2 (fcaminhoes,lcaminhoes,(vr_capcarr,vr_expcarr,vr_sitcorte)) =
if lcaminhoes = nil then l`(vr_capcarr,vr_expcarr,0.0)
else
let
    val (vr_capcam1,vr_expcam1,vr_sitcorte1,ordem1) = fcaminhoes
    val (vr_capcam,vr_expcam,sit_corte1,ordem) = hd lcaminhoes
in
if (vr_capcam + vr_capcarr) <= (coroa*vl_capcam)
    then l`(vr_capcarr,vr_expcarr,0.0)
else empty
end

fun dis_CarreCam (fcaminhoes,carregadeira,lcaminhoes) =
if lcaminhoes = nil then true
else
let
    val (vr_capcam1,vr_expcam1,vr_sitcorte1,ordem1) = fcaminhoes
    val (vr_capcarr,vr_expcarr,vr_sitcorte) = carregadeira
    val (vr_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte,ordem) = hd lcaminhoes
in
if vr_capcam >= vl_capcam then false
else true
end

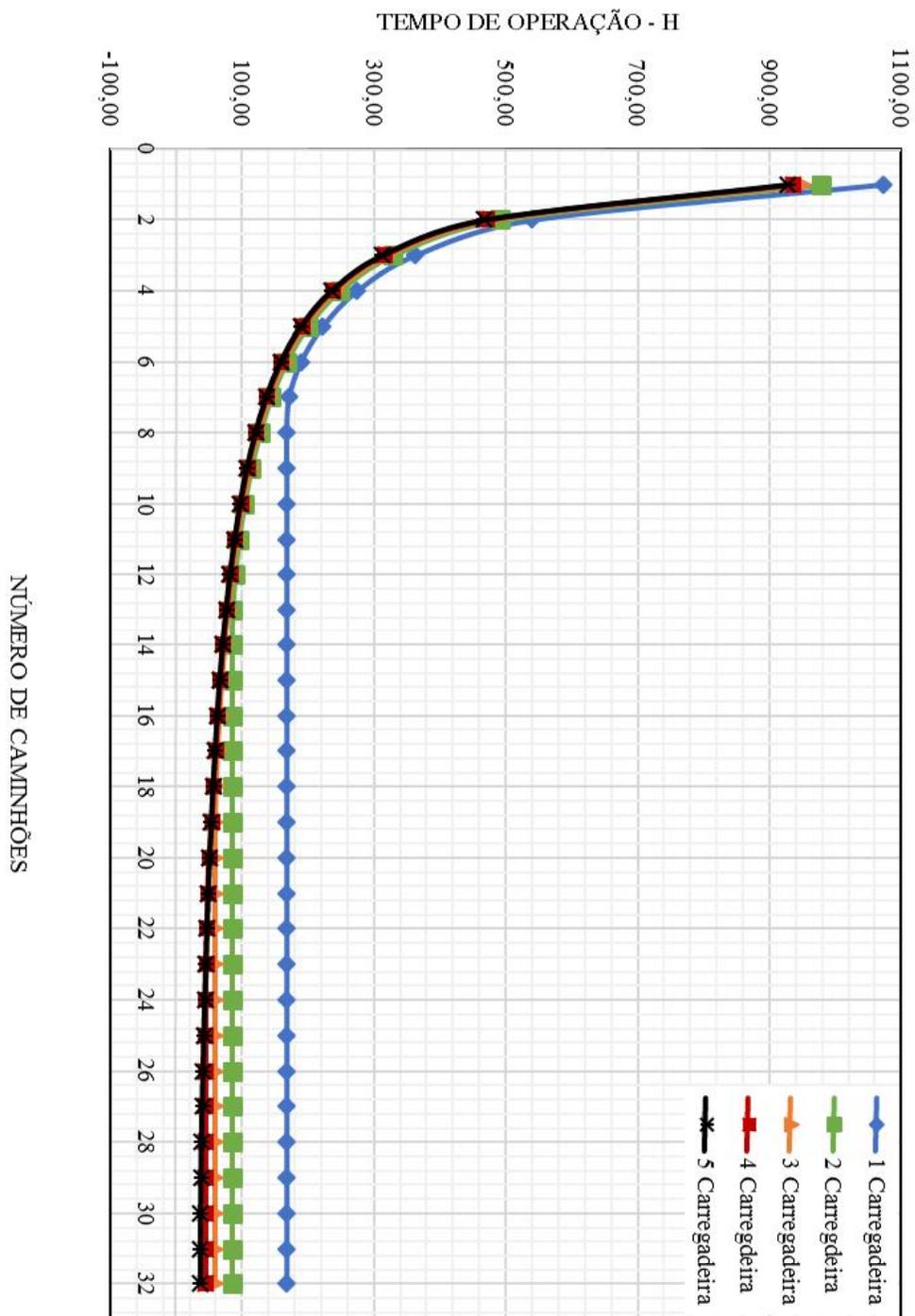
fun dis_LibCam (lcaminhoes) =
if lcaminhoes = nil then false
else
let

```

```
    val (vr_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte,ordem) = hd lcaminhoes
  in
  if vr_capcam < vl_capcam then
    if vr_sitcorte = 0.0 then true
    else false
  else true
end

fun LibCam (lcaminhoes)=
  if lcaminhoes= nil then empty
  else
  let
    val (vr_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte,ordem) = hd lcaminhoes
  in
  if vr_capcam = 0.0 then empty
  else l`(vr_capcam,vr_expcam,vr_sitcorte,ordem)
  end
end
```

APÊNDICE C – GRÁFICO COMPLETO: CUSTO X TEMPO



APÊNDICE D - CÁLCULOS PELO MÉTODO DE TRADICIONAL DE DIMENSIONAMENTO

$$Q = 3600 \times (C \times \varphi \times E \times k) / T = 3600 \times (3,49 \times 1,25 \times 0,83 \times 0,90) / 25,22 \Leftrightarrow$$

$$Q = 465,17 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n = q / (C \times k) = 17,6 / (3,49 \times 0,9) = 5,6$$

$$\Leftrightarrow n = 6$$

$$t_c = n \times T = 6 * 25,22 \Leftrightarrow$$

$$t_c = 151,50 \text{ s}$$

$$t_{cm} = t_c + 3600 \times DMT \times [1 / V_c + 1 / V_v] + t_d + t_m \Leftrightarrow$$

$$t_{cm} = 151,50 + 3600 \times 4,25 \times [1 / 54,40 + 1 / 73,70] + 78,00 + 18 \Leftrightarrow$$

$$t_{cm} = 736,35 \text{ s}$$

$$N = t_{cm} / t_c = 736,35 / 151,50 \Leftrightarrow$$

$$N = 4,86 \Leftrightarrow N = 5 \text{ caminhões}$$

APÊNDICE E – PARÂMETROS DE TEMPO DE ACORDO COM REGIME DE TRABALHO

Transição	Favorável	Médio	Desfavorável
Avanço ao Corte	1,65	2,16	2,65
Carregar Caçamba	4	6	9
Retorno Cheio	1,65	2,16	2,65
Manobra_i	1,35	1,85	2,35
Avanço	3	4	4,2
Carregar Caminhão	3,2	4,2	6
Retorno Vazio	3	3	6
Manobra_v	1,35	1,85	2,35
Descarregando	60	78	120
Manobra_c	9	18	60

APÊNDICE F – TABELA BASE PARA O GRÁFICO DA FIGURA 14

Caminhões	Carregadeiras				
	1	2	3	4	5
1	1072,70	980,93	950,13	937,16	928,05
2	540,47	493,79	477,95	471,15	467,03
3	363,15	331,33	320,64	315,90	312,93
4	275,05	250,29	241,94	238,17	236,08
5	223,01	201,63	194,71	191,70	189,85
6	189,95	169,39	163,28	160,65	159,01
7	171,86	146,30	140,91	138,58	137,06
8	168,28	129,21	124,07	121,90	120,72
9	168,25	115,86	111,04	109,03	107,81
10	168,34	105,43	100,52	98,66	97,56
11	168,34	97,26	92,16	90,24	89,19
12	168,34	91,06	85,08	83,20	82,15
13	168,34	87,44	79,07	77,31	76,30
14	168,34	86,43	74,12	72,20	71,26
15	168,20	86,38	69,82	67,78	66,81
16	168,20	86,38	66,19	63,97	63,03
17	168,20	86,38	63,14	60,70	59,67
18	168,20	86,38	60,86	57,70	56,71
19	168,20	86,38	59,55	55,04	54,04
20	168,20	86,38	59,18	50,66	51,71
21	168,20	86,38	59,16	48,83	49,46
22	168,20	86,38	59,02	47,38	47,52
23	168,20	86,38	59,02	46,29	45,73
24	168,20	86,38	59,02	45,67	44,13
25	168,20	86,38	59,02	45,52	42,65
26	168,20	86,38	59,02	45,52	41,36
27	168,20	86,38	59,02	45,50	40,16
28	168,20	86,38	59,02	45,49	39,11
29	168,20	86,38	59,02	45,48	38,25
30	168,20	86,38	59,02	45,47	37,69
31	168,20	86,38	59,02	45,45	37,41
32	168,20	86,38	59,02	45,44	37,29

APÊNDICE G – TABELA BASE PARA OS GRÁFICOS DAS FIGURAS 15 16

Caminhões	Carregadeiras				
	1	2	3	4	5
1	805.295,95	932.944,11	1.094.018,18	1.266.849,34	1.440.479,35
2	703.191,63	741.399,05	813.375,97	896.194,72	981.944,71
3	672.355,82	679.822,81	722.134,47	774.754,23	830.157,45
4	660.622,19	651.284,49	678.052,37	715.195,22	756.214,98
5	658.370,87	635.634,90	652.825,63	681.169,74	712.611,66
6	665.303,46	627.232,14	637.316,30	659.243,55	684.366,69
7	696.539,35	622.269,40	627.556,52	644.965,93	665.312,24
8	774.653,82	620.680,24	620.835,05	634.421,38	652.436,98
9	867.097,06	620.320,04	616.742,93	627.425,84	642.037,21
10	960.193,38	622.489,86	613.644,57	622.080,11	634.691,02
11	1.052.839,89	627.795,92	613.360,38	618.601,36	629.301,85
12	1.145.486,41	637.843,94	613.063,78	616.164,54	624.851,73
13	1.238.132,93	660.614,90	613.244,00	615.072,81	622.308,95
14	1.330.779,44	700.603,92	615.608,80	614.151,04	620.488,63
15	1.422.257,28	747.752,40	618.378,36	613.898,45	618.491,24
16	1.514.827,73	795.294,83	622.625,36	614.553,80	618.196,83
17	1.607.398,18	842.837,27	628.738,05	616.546,06	618.099,70
18	1.699.968,64	890.379,70	639.453,97	617.802,75	618.577,05
19	1.792.539,09	937.922,13	658.474,16	619.659,89	619.201,68
20	1.885.109,54	985.464,57	686.941,42	598.187,27	620.925,82
21	1.977.679,99	1.033.007,00	719.252,41	603.451,04	621.231,06
22	2.070.250,44	1.080.549,44	750.120,79	611.607,23	622.911,41
23	2.162.820,89	1.128.091,87	782.604,58	623.008,97	624.633,56
24	2.255.391,34	1.175.634,30	815.088,37	639.820,55	627.062,78
25	2.347.961,79	1.223.176,74	847.572,16	662.768,75	629.616,63
26	2.440.532,24	1.270.719,17	880.055,95	687.820,29	633.235,70
27	2.533.102,70	1.318.261,60	912.539,74	712.519,10	637.019,99
28	2.625.673,15	1.365.804,04	945.023,53	737.436,54	641.934,42
29	2.718.243,60	1.413.346,47	977.507,32	762.282,79	648.774,97
30	2.810.814,05	1.460.888,91	1.009.991,11	787.116,64	660.105,80
31	2.903.384,50	1.508.431,34	1.042.474,90	811.938,10	675.670,90
32	2.995.954,95	1.555.973,77	1.074.958,69	836.747,17	694.051,78

APÊNDICE H - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA UMA CARREGADEIRA

Carregadeiras	Caminhões	Tempo em Segundos					Média em Horas	Custo em Reais
		Replicação 1	Replicação 2	Replicação 3	Replicação 4	Replicação 5		
1	1	3866097,33	3858633,22	3862936,25	3863151,94	3857747,94	1072,70	805.295,95
1	2	1945773,01	1944282,70	1946025,53	1947525,28	1944810,91	540,47	703.191,63
1	3	1307649,44	1307305,04	1306666,32	1309664,82	1305466,78	363,15	672.355,83
1	4	989042,49	991267,14	990634,51	990807,37	989201,78	275,05	660.622,20
1	5	803678,50	802710,66	802592,95	803590,51	801666,44	223,01	658.370,89
1	6	685435,71	682764,65	683238,20	685576,27	682084,16	189,95	665.303,48
1	7	620331,15	617338,72	619321,86	620199,69	616339,26	171,86	696.539,37
1	8	607985,89	602968,23	606650,02	607165,44	604351,01	168,28	774.653,84
1	9	604943,35	605082,31	607020,15	606006,71	605461,04	168,25	867.097,08
1	10	605473,97	606303,10	606502,38	605748,61	606056,51	168,34	960.193,40
1	11						168,34	1.019.111,71
1	12						168,34	1.111.758,23
1	13						168,34	1.204.404,75
1	14						168,34	1.297.051,27
1	15						168,34	1.389.697,79
1	16						168,34	1.482.344,31
1	17						168,34	1.574.990,83
1	18						168,34	1.667.637,35
1	19						168,34	1.760.283,87
1	20						168,34	1.852.930,39
1	21						168,34	1.945.576,91
1	22						168,34	2.038.223,43
1	23						168,34	2.130.869,95
1	24						168,34	2.223.516,47
1	25						168,34	2.316.162,99
1	26						168,34	2.408.809,51
1	27						168,34	2.501.456,02
1	28						168,34	2.594.102,54
1	29						168,34	2.686.749,06
1	30						168,34	2.779.395,58
1	31						168,34	2.872.042,10
1	32						168,34	2.964.688,62

APÊNDICE I - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA DUAS CARREGADEIRA

Carregadeiras	Caminhões	Tempo em Segundos					Média em Horas	Custo em Reais
		Replicação 1	Replicação 2	Replicação 3	Replicação 4	Replicação 5		
2	1	3527679,33	3531164,94	3530972,60	3534326,93	3532619,19	980,93	932.944,12
2	2	1779697,52	1776239,67	1777674,41	1777574,00	1777070,34	493,79	741.399,06
2	3	1192994,32	1192088,25	1192315,55	1193200,10	1193341,15	331,33	679.822,82
2	4	901021,96	901010,40	900126,44	901611,65	901379,55	250,29	651.284,51
2	5	725796,83	724685,12	726393,09	726424,78	725996,25	201,63	635.634,91
2	6	609914,43	608768,88	609708,51	611275,32	609359,27	169,39	627.232,16
2	7	526728,85	526508,10	526626,26	527343,53	526279,64	146,30	622.269,42
2	8	465578,91	464544,69	466169,28	465411,62	464102,13	129,21	620.680,26
2	9	416954,12	416745,28	417623,40	417189,18	417002,52	115,86	620.320,07
2	10	379839,19	379202,29	380008,97	379128,68	379553,03	105,43	622.489,89
2	11	349804,70	350082,34	350860,36	350117,77	349853,24	97,26	627.795,95
2	12	327922,19	327948,59	327875,32	327747,96	327496,09	91,06	637.843,98
2	13	314979,55	315067,77	315492,95	314374,35	313935,70	87,44	660.614,93
2	14	310746,01	310889,01	309851,64	312102,65	312202,02	86,43	700.603,95
2	15	310917,38	310685,20	309840,38	311903,33	311570,22	86,38	747.752,44
2	16						86,38	795.255,74
2	17						86,38	842.795,84
2	18						86,38	890.335,94
2	19						86,38	937.876,03
2	20						86,38	985.416,13
2	21						86,38	1.032.956,23
2	22						86,38	1.080.496,32
2	23						86,38	1.128.036,42
2	24						86,38	1.175.576,52
2	25						86,38	1.223.116,61
2	26						86,38	1.270.656,71
2	27						86,38	1.318.196,81
2	28						86,38	1.365.736,90
2	29						86,38	1.413.277,00
2	30						86,38	1.460.817,10
2	31						86,38	1.508.357,19
2	32						86,38	1.555.897,29

APÊNDICE J - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA TRÊS CARREGADEIRA

Carregadeiras	Caminhões	Tempo em Segundos					Média em Horas	Custo em Reais
		Replicação 1	Replicação 2	Replicação 3	Replicação 4	Replicação 5		
3	1	3421769,72	3420670,96	3420129,51	3419287,70	3420489,93	950,13	1.094.018,19
3	2	1720160,98	1722275,22	1720088,73	1720174,81	1720407,33	477,95	813.375,98
3	3	1153778,94	1155396,95	1153512,80	1155216,10	1153630,38	320,64	722.134,48
3	4	871709,83	870617,06	871165,56	870669,28	870826,99	241,94	678.052,39
3	5	700619,81	700965,94	700469,21	700972,44	701679,48	194,71	652.825,64
3	6	588109,30	586768,70	587564,44	588723,55	587852,32	163,28	637.316,32
3	7	506835,65	507500,76	507056,63	507952,41	507033,61	140,91	627.556,54
3	8	447101,26	445767,41	446710,97	447270,55	446387,36	124,07	620.835,08
3	9	400310,80	399897,45	399820,89	398919,62	399742,92	111,04	616.742,95
3	10	362079,42	361441,18	362424,19	361884,94	361536,65	100,52	613.644,60
3	11	331781,03	331702,41	332297,07	331340,41	331845,43	92,16	613.360,41
3	12	306497,24	306249,51	306414,24	306241,30	306108,61	85,08	613.063,81
3	13	284315,68	285025,97	284596,49	284695,73	284617,05	79,07	613.244,03
3	14	266955,12	266891,50	266774,66	266932,14	266518,22	74,12	615.608,84
3	15	251278,76	251436,45	251335,37	251035,29	251712,68	69,82	618.378,40
3	16	238685,57	238074,50	238482,02	238393,22	237759,18	66,19	622.625,40
3	17	227765,86	227031,50	227655,53	227481,16	226659,14	63,14	628.738,10
3	18	219428,86	218656,75	219280,50	219344,91	218707,18	60,86	639.454,02
3	19	214027,65	214158,64	214927,41	214669,52	214076,21	59,55	658.474,21
3	20	213318,89	213066,87	213585,04	212759,77	212452,78	59,18	686.941,48
3	21	212766,88	212440,35	213691,02	213175,12	212728,63	59,16	719.252,47
3	22	212101,29	212027,48	211859,94	213341,37	213080,44	59,02	750.120,85
3	23						59,02	782.567,43
3	24						59,02	815.049,67
3	25						59,02	847.531,92
3	26						59,02	880.014,17
3	27						59,02	912.496,42
3	28						59,02	944.978,66
3	29						59,02	977.460,91
3	30						59,02	1.009.943,16
3	31						59,02	1.042.425,40
3	32						59,02	1.074.907,65

APÊNDICE K - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA QUATRO CARREGADEIRA

Carregadeiras	Caminhões	Tempo em Segundos					Média em Horas	Custo em Reais
		Replicação 1	Replicação 2	Replicação 3	Replicação 4	Replicação 5		
4	1	3369966,50	3376641,94	3374181,56	3371209,32	3376833,55	937,16	1.266.849,35
4	2	1695898,03	1695632,16	1697807,52	1695090,65	1696196,33	471,15	896.194,73
4	3	1136331,77	1137244,36	1137007,70	1137582,35	1138057,10	315,90	774.754,24
4	4	856701,25	857882,11	857847,02	857920,98	856704,47	238,17	715.195,23
4	5	690468,90	689739,47	690609,48	689764,98	690086,29	191,70	681.169,75
4	6	578770,41	577750,62	578216,39	578178,88	578784,69	160,65	659.243,57
4	7	499338,61	499101,46	498980,00	498859,46	498238,50	138,58	644.965,95
4	8	438547,45	438971,23	438807,94	439627,99	438296,59	121,90	634.421,41
4	9	392279,79	392645,88	392620,17	392750,57	392222,04	109,03	627.425,87
4	10	355759,68	355419,50	354958,87	354614,07	355198,94	98,66	622.080,14
4	11	325149,42	324246,56	324787,59	325076,51	324981,40	90,24	618.601,39
4	12	299548,66	299601,36	299996,56	299532,61	298933,79	83,20	616.164,57
4	13	278263,73	277936,63	278174,90	278687,95	278483,33	77,31	615.072,85
4	14	260111,30	259599,08	260078,79	259968,04	259807,28	72,20	614.151,08
4	15	243887,85	243882,68	243933,56	244245,97	244141,36	67,78	613.898,49
4	16	230097,27	230467,49	229887,06	230395,15	230577,92	63,97	614.553,84
4	17	218604,87	218559,85	218399,12	218355,22	218649,44	60,70	616.546,11
4	18	207812,66	207890,04	207449,51	207800,68	207572,84	57,70	617.802,80
4	19	198264,70	198105,44	198094,64	198257,18	198004,77	55,04	619.659,94
4	20	182566,41	182060,58	182396,91	182405,86	182391,74	50,66	598.187,33
4	21	175691,94	175800,69	176134,23	175647,97	175608,56	48,83	603.451,10
4	22	170414,10	170672,59	170936,05	170437,34	170326,67	47,38	611.607,29
4	23	166873,31	166350,13	167005,11	166507,90	166428,17	46,29	623.009,03
4	24	164568,59	164518,92	164405,48	164233,16	164308,49	45,67	639.820,62
4	25	164023,25	163523,26	164030,07	164423,05	163332,67	45,52	662.768,82
4	26	164066,40	163535,55	163987,53	164000,73	163336,67	45,50	687.480,03
4	27						45,50	712.582,78
4	28						45,50	737.624,16
4	29						45,50	762.665,54
4	30						45,50	787.706,92
4	31						45,50	812.748,30
4	32						45,50	837.789,68

APÊNDICE L - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA CINCO CARREGADEIRA

Carregadeiras	Caminhões	Tempo em Segundos					Média em Horas	Custo em Reais
		Replicação 1	Replicação 2	Replicação 3	Replicação 4	Replicação 5		
5	1	3336771,83	3343002,05	3340934,77	3342779,20	3341380,54	928,05	1.440.479,36
5	2	1680359,43	1682470,78	1681866,88	1681748,83	1680135,17	467,03	981.944,71
5	3	1125291,85	1127100,53	1125785,83	1127296,84	1127208,81	312,93	830.157,46
5	4	850902,64	849491,11	849226,34	849601,64	850185,10	236,08	756.215,00
5	5	683226,45	683453,14	683723,12	683553,77	683298,99	189,85	712.611,67
5	6	572870,21	571942,15	572728,79	572061,23	572552,65	159,01	684.366,71
5	7	493259,96	493280,29	493492,56	493829,52	493140,39	137,06	665.312,26
5	8	434851,84	434529,27	435135,80	434242,51	434147,40	120,72	652.437,00
5	9	387764,89	387743,02	388149,90	388739,28	388256,59	107,81	642.037,24
5	10	350800,46	351441,68	351285,64	351334,97	351284,28	97,56	634.691,05
5	11	321198,26	321056,60	321361,04	320781,68	321018,98	89,19	629.301,88
5	12	295826,36	295422,43	295577,13	295595,33	296300,07	82,15	624.851,77
5	13	274411,81	274940,52	274704,33	274608,88	274667,28	76,30	622.308,99
5	14	256662,15	256477,95	256672,14	256265,29	256683,63	71,26	620.488,67
5	15	240690,83	240800,44	240769,98	240082,37	240270,90	66,81	618.491,28
5	16	226582,06	226923,73	226975,02	227066,21	227041,38	63,03	618.196,88
5	17	215027,30	214998,86	214805,92	214687,17	214614,88	59,67	618.099,74
5	18	203900,80	203972,95	204324,64	204473,28	204056,42	56,71	618.577,10
5	19	194309,95	194486,50	194763,40	194656,87	194466,90	54,04	619.201,74
5	20	186007,25	186044,70	185928,36	186260,79	186449,70	51,71	620.925,88
5	21	178476,29	177900,30	177611,84	177938,58	178417,73	49,46	621.231,12
5	22	171028,49	170975,11	171185,97	171147,80	170936,92	47,52	622.911,47
5	23	164510,61	164740,12	164310,17	164690,90	164833,07	45,73	624.633,63
5	24	158755,03	158824,29	158712,28	159002,15	158990,68	44,13	627.062,84
5	25	153464,51	153704,30	153662,75	153672,70	153279,38	42,65	629.616,70
5	26	148987,24	148937,39	149010,41	148926,94	148578,28	41,36	633.235,77
5	27	145007,97	144568,22	144397,79	144491,00	144439,32	40,16	637.020,06
5	28	140913,62	140720,38	140663,93	140932,43	140821,88	39,11	641.934,50
5	29	137775,31	137585,82	137859,09	137678,36	137568,90	38,25	648.775,05
5	30	135672,03	135519,75	135290,67	136195,59	135799,50	37,69	660.105,88
5	31	134680,89	134569,45	134956,75	134721,20	134387,58	37,41	675.670,98
5	32	134268,63	134038,20	134517,88	134216,78	134140,96	37,29	694.051,87

APÊNDICE M - TABELAS DE REPLICAÇÕES PARA REGIME DE TRABALHO, FATOR DE OPERADOR, COROAMENTO E FATOR DE REDUÇÃO DE VELOCIDADE

Replicações	REGIME		
	Favorável	Médio	Desfavorável
1	153581,61	167575,92	228161,1892
2	154060,81	167835,10	227561,7938
3	154197,34	167599,07	228717,1749
4	153960,20	167895,33	229231,8235
5	153678,45	167628,51	229106,697
Média (h)	42,75	46,59	63,49

Replicações	FATOR DE OPERADOR		
	FRACO - 0,6	REGULAR - 0,75	EXCELENTE - 1,0
	REGIME DESFAVORÁVEL		
1	364419,59	297180,57	228161,19
2	365434,42	298122,16	227561,79
3	365404,48	296787,58	228717,17
4	365304,89	296947,93	229231,82
5	365918,81	297659,57	229106,70
Média (h)	101,47	82,59	63,49
REGIME MÉDIO			
1	276030,04	221091,64	167575,92
2	275844,63	221555,55	167835,10
3	274862,70	221451,67	167599,07
4	275589,48	220798,14	167895,33
5	274913,72	221355,18	167628,51
Média (h)	76,51	61,46	46,59
REGIME FAVORÁVEL			
1	256105,0188	204522,5508	153581,61
2	255691,5334	204716,2531	154060,81
3	255263,9067	204653,1489	154197,34
4	255798,1978	204274,9805	153960,20
5	255158,2752	204565,4266	153678,45
Média (h)	71,00	56,82	42,75

Replicações	FATOR DE REDUÇÃO DE VELOCIDADE	
	FATOR = 0,92	FATOR = 1,0
1	153603,98	143907,83
2	153824,52	143920,89
3	153684,37	143958,46
4	153853,99	143994,86
5	153801,73	143930,20
Média (h)	42,71	39,98

Replicações	COROAMENTO	
	FATOR = 1,0	FATOR = 1,43
1	164669,5747	153675,8624
2	164613,7431	153741,1332
3	164359,0142	153797,4797
4	164718,9829	153922,2074
5	164511,2775	153632,7832
Média (h)	45,72	42,71