

VICTOR HUGO BARROSO BARBOSA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA
SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS EM OBRAS DE CONSTRUÇÃO
RODOVIÁRIA**

**Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes
(PETRAN), da Universidade Federal
do Ceará (UFC), como requisito
parcial para obtenção do Título de
Mestre em Ciências (M.Sc.) em
Engenharia de Transportes. Área de
concentração: Infraestrutura de
Transportes.**

ORIENTADOR:

**Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre
Júnior**

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- B213d Barbosa, Víctor Hugo Barroso.
obras de Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para seleção de equipamentos em
construção rodoviária / Víctor Hugo Barroso Barbosa – 2012
101 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2012.
Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.
Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.
1. Transportes. 2. Planejamento rodoviário. 3. Rodovias – equipamentos e reconstrução.
I. Título.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA
SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS EM OBRAS DE CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA

Victor Hugo Barroso Barbosa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE TRANSPORTES (PETRAN), DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO CEARÁ (UFC), COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES

Aprovado por:

Prof. Ernesto Ferreira Nobre Júnior, Ph.D.

(Orientador - UFC)

Prof. Bruno de Athayde Prata, Ph.D.

(Examinador Interno - UFC)

Prof. José Weissmann, Ph.D.

(Examinador Externo - UTSA)

FORTALEZA, CE - BRASIL

Agosto - 2012

“O Eu é o mestre do eu. Que outro mestre poderia existir? Tudo existe é um dos extremos. Nada existe é o outro extremo. Devemos sempre nos manter afastados desses dois extremos e seguir o Caminho do Meio”.

Buda

DEDICATÓRIA

À minha mãe Maria da Paz.

Ao meu pai Sebastião (in memoriam).

Ao meu irmão Wladimir.

À minha avó Maria (in memoriam).

A Deus.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças para a conclusão deste trabalho e por sempre guiar meus passos na caminhada para o sucesso.

Ao Professor Ernesto Ferreira Nobre Júnior, pela amizade, pela motivação contagiante e por ter acreditado em mim e na conclusão deste trabalho, apesar de todas as dificuldades.

À banca examinadora deste trabalho, formada pelo Professor José Weissmann, da *University of Texas at San Antonio*, e pelo Professor Bruno de Athayde Prata, da Universidade Federal do Ceará, pela valiosa contribuição para este trabalho e pela ilustre presença na defesa desta Dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN) da Universidade Federal do Ceará (UFC), em especial à Professora Suelly Helena de Araújo Barroso, por acreditar na conclusão deste trabalho e por prestar todo o apoio necessário a essa conclusão, assim como à Ivone, também pelo apoio.

À minha mãe, Maria da Paz Barroso, minha maior fonte de motivação, e ao meu irmão, Artur Wladimir Barroso, pelo apoio incondicional em minha vida.

Àquela que tem sido minha grande fonte de inspiração nos últimos meses, minha namorada, Camila Alcântara, pela motivação e pelos momentos de felicidade divididos comigo nos últimos meses, tão necessários nesta caminhada.

Aos meus amigos e colegas de trabalho do Ministério dos Transportes em Brasília-DF, sem os quais a minha jornada nos últimos anos teria sido bastante difícil, pelo apoio e pela amizade, em especial, Gilson, Carlos Alberto, Francione, Emanuel, Paulo Falcão e Rômulo, e meu ilustre chefe, Paulo Sérgio da Silva Souza, pelo apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS (Continuação)

A todos aqueles que já fizeram parte de minha vida profissional, em especial, os colegas do DER/CE e meu ex-chefe na Consultora de Engenharia HSZ, Dr. Hermano Zenaide, pelo apoio e pelo aprendizado.

A todos aqueles que fizeram parte da minha formação escolar e acadêmica, em especial, aqueles que fizeram parte da minha formação básica no Colégio Vinicius de Moraes, representado pela Tia Eliane, e as professoras Dejene e Socorro Oliveira, da Escola de Ensino Fundamental e Médio Dona Hilza Diogo de Oliveira, que sempre me incentivaram e acreditaram em meu potencial.

Aos meus amigos mais próximos, Cássio, Charles, Marcelo, Mardônio (*in memoriam*), Mônica, Kelly, Juliana, Jéssica e Priscila, pela amizade e pelo incentivo, e todos os outros amigos e colegas que não foram citados aqui.

À Adelaide, à Adriana e à Andréa, pela grande parcela em minha formação escolar básica.

Em especial, àqueles que desacreditaram na conclusão deste trabalho. Sua descrença foi o combustível para o meu êxito.

RESUMO

Uma das principais características de obras rodoviárias é a forte incidência de equipamentos pesados usados nos serviços de terraplenagem e de pavimentação, que correspondem à maior parcela do orçamento de uma obra desse gênero. Apesar dessa importância, o processo de seleção dos equipamentos não é bem definido. Empreiteiras dependem de julgamentos subjetivos baseados em experiências anteriores, e, muitas vezes, não há sequer, nenhum processo de seleção, adotando-se a prática de utilizar em todas as obras os mesmos equipamentos disponíveis. O presente trabalho de dissertação vem contribuir com o preenchimento desta lacuna, tendo como objetivo desenvolver um sistema de apoio à decisão para a seleção da frota de equipamentos. Apresenta-se a ferramenta computacional denominada de Sistema para Seleção de Equipamentos de Terraplenagem e Pavimentação (SiSEq), que pode, a partir das informações de projeto, permitir ao tomador de decisão escolher a frota ideal de equipamentos. Como resultado, o SiSEq apresenta cenários de configurações de frotas, com produções dos equipamentos, número de unidades necessárias para atender ao prazo e custos de produção. Espera-se mostrar ao setor de construção que a ferramenta proposta pode ser útil na avaliação de cenários, o que pode levar a reduções de custos substanciais no valor de uma obra.

Palavras-chave: Obras Rodoviárias. Planejamento de Obras. Equipamentos de Construção. Sistemas de Apoio à Decisão.

ABSTRACT

One of the main characteristics of road construction projects is the high utilization of heavy construction equipment in earthmoving and paving jobs, which correspond to the largest percentage of the budget of a project of this type. Despite its importance, the selection of equipment is not well defined. Contractors depend on subjective judgments based on personal experience and there is not usually any selection method. Contractors usually use the same construction equipment in all the projects. This thesis is a contribution to solve that problem and aims to develop a decision support system for selecting the equipment fleet. This work presents a computational system called SiSEq, which allows the decision maker to choose the ideal equipment fleet for a road construction project. SiSEq presents fleets scenarios, with production rates of the equipments, number of units required to meet the deadline and production costs. It is expected to show the construction community that the proposed system can be useful in evaluation of scenarios and in reduction of costs.

Keywords: Road Construction. Construction Planning. Construction Equipment. Decision Support Systems.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. APRESENTAÇÃO E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	1
1.2. PROBLEMA DA PESQUISA.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. Objetivo Geral.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. ETAPAS DA PESQUISA	3
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
CAPÍTULO 2 EQUIPAMENTOS E SUAS APLICAÇÕES	6
2.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE OBRAS RODOVIÁRIAS	6
2.2. EQUIPAMENTOS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO.....	8
2.2.1. Unidades de tração (trator)	8
2.2.2. Unidades escavo-empurradoras	10
2.2.3. Unidades escavo-transportadoras.....	16
2.2.3.1. <i>Scraper</i> rebocado	21
2.2.3.2. <i>Motoscraper</i> convencional com rebocador de um eixo.....	21
2.2.3.3. <i>Motoscraper</i> convencional com rebocador de dois eixos.....	21
2.2.3.4. <i>Motoscraper</i> com motor traseiro	22
2.2.3.5. <i>Motoscraper</i> com esteira elevatória.....	22
2.2.3.6. <i>Motoscraper</i> com trado helicoidal.....	22
2.2.3.7. <i>Push-pull scraper</i>	23
2.2.4. Unidades escavocarregadoras	23
2.2.4.1. Carregadeiras	23
2.2.4.2. Escavadeiras.....	25
2.2.5. Unidades aplainadoras	30
2.2.6. Unidades de transporte.....	31
2.2.6.1. Caminhões basculantes comuns.....	31
2.2.6.2. Vagões	32
2.2.6.3. <i>Dumpers</i>	33
2.2.6.4. Caminhões fora-de-estrada	34
2.2.7. Unidades compactadoras	35
2.2.7.1. Rolos pé-de-carneiro.....	35
2.2.7.2. Rolos lisos.....	36
2.2.7.3. Rolos pneumáticos.....	37
2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
CAPÍTULO 3 SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....	40
3.1. A PRÁTICA DA SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS	40
3.1.1. Fatores naturais	42
3.1.2. Fatores de projeto.....	43
3.1.3. Fatores econômicos.....	43
3.1.4. Seleção de tratores de lâmina.....	44
3.1.5. Seleção de <i>scrapers</i>	44
3.1.6. Seleção de carregadeiras	45
3.1.7. Seleção de escavadeiras	46
3.1.8. Seleção de caminhões	47

3.2.	ESTADO DA ARTE	50
3.3.	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE EQUIPAMENTOS	53
3.3.1.	Locomoção dos equipamentos.....	54
3.3.2.	Tempo de ciclo de transporte.....	61
3.3.3.	Conceito de produção de equipamentos	62
3.4.	CUSTOS DE PRODUÇÃO	64
3.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
CAPÍTULO 4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO		67
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	67
4.2.	APRESENTAÇÃO DO SAD DESENVOLVIDO	67
4.3.	CONCEPÇÃO DO SAD.....	68
4.4.	O MODELO DO SAD	69
4.5.	LIMITAÇÕES DO SISTEMA	72
4.6.	RECURSOS UTILIZADOS.....	74
4.6.1.	Dados necessários	74
4.6.2.	Ferramentas computacionais utilizadas	74
4.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
CAPÍTULO 5 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO		77
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	77
5.2.	EXEMPLO DE ANÁLISE.....	77
5.3.	ENTRADA DE DADOS	79
5.4.	RESULTADOS	82
5.4.1.	Tempo de viagem dos caminhões.....	82
5.4.2.	Dimensionamento das equipes.....	86
5.4.2.1.	Cenário 1	87
5.4.2.2.	Cenário 2.....	91
5.5.	CUSTOS UNITÁRIOS DE PRODUÇÃO	93
5.6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Trator montado sobre esteiras. Fonte: CATERPILLAR (2012a).....	11
Figura 2.2: Trator montado sobre pneus. Fonte: CATERPILLAR (2012b).....	11
Figura 2.3: <i>Angledozer</i> . Fonte: NEW HOLLAND (2012a).....	12
Figura 2.4: <i>Tilt-dozer</i> . Fonte: NEW HOLLAND (2012b).....	12
Figura 2.5: Lâmina U. Fonte: PANABAR (2012).....	14
Figura 2.6: Lâmina S. Fonte: XGGM-MACHINE (2012).....	14
Figura 2.7: Trator de lâmina com escarificador acoplado à parte traseira. Fonte: HEAVY EQUIPMENT FORUMS (2012a).....	15
Figura 2.8: <i>Scraper</i> de um eixo rebocado por trator de esteiras. Fonte: AGATTACH (2012).	17
Figura 2.9: <i>Scraper</i> de dois eixos rebocado por trator de esteiras. Fonte: HEAVY EQUIPMENT (2012a).....	17
Figura 2.10: <i>Scraper</i> rebocado por trator de rodas (<i>tandem</i>). Fonte: DEERE (2012).....	17
Figura 2.11: <i>Motoscraper</i> convencional. Fonte: HEAVY EQUIPMENT UPDATES (2012).....	18
Figura 2.12: <i>Motoscraper</i> com motor traseiro. Fonte: WIKIMEDIA (2012).....	19
Figura 2.13: <i>Motoscraper</i> com esteira elevatória. Fonte: ELKINS MACHINERY (2012).....	19
Figura 2.14: <i>Motoscraper</i> com trado helicoidal. Fonte: BAU FORUM (2012).....	20
Figura 2.15: Carregadeira de esteiras. Fonte: VIA RURAL (2012).....	24
Figura 2.16: Carregadeira de pneus. Fonte: CATERPILLAR (2012c).....	24
Figura 2.17: Escavadeira com caçamba frontal. Fonte: AUTOLINE-EU (2012).....	26
Figura 2.18: Escavadeira <i>drag-line</i> . Fonte: HEAVY EQUIPMENT (2012b).....	27
Figura 2.19: Lança <i>clam-shell</i> . Fonte: PEURIFOY <i>et al.</i> (2011).....	28
Figura 2.20: Escavadeira <i>clam-shell</i> . Fonte: PEURIFOY <i>et al.</i> (2011).....	28
Figura 2.21: Escavadeira com caçamba retroescavadora. Fonte: CATERPILLAR (2012d).....	29
Figura 2.22: Restroescavadeira. Fonte: CATERPILLAR (2012e).....	30
Figura 2.23: Motoniveladora. Fonte: CATERPILLAR (2012f).....	30
Figura 2.24: Caminhão basculante comum. Fonte: TERRAPLENAGEM (2012).....	32

Figura 2.25: Vagão com fundo móvel. Fonte: HEAVY EQUIPMENT FORUMS (2012b).	33
Figura 2.26: <i>Dumper</i> . Fonte: Fonte: TEREX (2012a).	33
Figura 2.27: Caminhão fora-de-estrada rígido. Fonte: TEREX (2012b).	35
Figura 2.28: Caminhão fora-de-estrada articulado. Fonte: VOLVO (2012).	35
Figura 2.29: Rolo compactador pé-de-carneiro. Fonte: CATERPILLAR (2012g).	36
Figura 2.30: Rolo compactador liso. Fonte: CATERPILLAR (2012h).	37
Figura 2.31: Rolo compactador pneumático. Fonte: DYNAPAC (2012).	38
Figura 3.1: Campo de aplicação dos diferentes tipos de <i>scrapers</i> . Fonte: RICARDO e CATALANI (2007).	44
Figura 3.2: Compatibilidade entre a altura de despejo da carregadeira (D) e a altura de carregamento do caminhão (B). Fonte: EL-MOSLMANI (2002).	46
Figura 3.3: Determinação da capacidade do caminhão e do custo de produção. Fonte: KARSHENAS (1989).	48
Figura 3.4: Determinação do número de caminhões e da produção da equipe. Fonte: KARSHENAS (1989).	49
Figura 3.5: Planilha desenvolvida para seleção de <i>scrapers</i> . Fonte: MAYFIELD (2004).	53
Figura 3.6: Exemplo de diagrama tração x velocidade.	59
Figura 5.1: Entrada de dados no SiSEq – Tipo de Análise.	79
Figura 5.2: Entrada de dados no SiSEq – Dados do Serviço.	80
Figura 5.3: Entrada de dados no SiSEq – Material Movimentado.	80
Figura 5.4: Entrada de dados no SiSEq – Caminho de Serviço.	81
Figura 5.5: Entrada de dados no SiSEq – Tempos Fixos.	82
Figura 5.6: Resultado gerado pelo SiSEq – Tempo de viagem dos caminhões.	85
Figura 5.7: Resultado gerado pelo SiSEq – Dimensionamento das equipes.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características dos tipos de tratores.	10
Tabela 3.1: Exemplo de dimensionamento de equipamentos.	41
Tabela 3.2: Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de <i>scrapers</i>	45
Tabela 3.3: Coeficientes de rolamento.....	55
Tabela 3.4: Fatores de redução para determinação de velocidades médias, considerando as zonas de aceleração e de desaceleração.....	62
Tabela 5.1: Características do solo a ser movimentado.	78
Tabela 5.2: Características do caminho de serviço.	78
Tabela 5.3: Especificações da carregadeira CAT 924G Caterpillar.....	78
Tabela 5.4: Especificações do caminhão CAT 770 Caterpillar.	78
Tabela 5.5: Exemplo de análise - características gerais do serviço.	79
Tabela 5.6: Exemplo de análise - valores de tempos fixos	82
Tabela 5.7: Valores de coeficientes de rolamento e de aderência.....	83
Tabela 5.8: Resultados da estimativa da velocidade de viagem dos caminhões.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ASD	<i>Active Server Pages</i>
CHP	Custo Horário Produtivo
CHI	Custo Horário Improdutivo
CIN	<i>Cost Index Number</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESEMPS	<i>Expert System for Earth-moving Plant Selection</i>
FPC	<i>Fleet Production and Cost Analysis</i>
FLSELECTOR	<i>Fleet Selector</i>
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SE	Sistema Especialista
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SICRO	Sistema de Custos Rodoviários
SiSeq	Sistema para Seleção de Equipamentos de Terraplenagem e Pavimentação
WPF	<i>Windows Presentation Foundation</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste Capítulo, apresentam-se o contexto que motivou esta pesquisa, o sistema de apoio à decisão (SAD) desenvolvido, os objetivos deste trabalho, as etapas da pesquisa e a estrutura do texto da Dissertação.

1.1. APRESENTAÇÃO E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2010), circulam pelas rodovias brasileiras cerca de 60% do total de cargas e 90% do total de passageiros, o que evidencia a importância que o transporte rodoviário tem sobre a matriz de transportes do país.

Diante dessa importância já consolidada e das necessidades de infraestrutura para se atender a grandes eventos internacionais a serem realizados no país nos próximos anos, verifica-se atualmente um grande volume de investimentos em rodovias no Brasil.

A grande dimensão desses investimentos pode ser confirmada por meio de projeções que indicam que, somente no período de 2012 a 2016, deverá ser investido cerca de R\$ 1,48 trilhão em infraestrutura no país, compreendendo 12.265 obras (M&T, 2011).

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma ferramenta computacional para auxiliar na melhor alocação dos equipamentos de construção pesada e consequentemente contribuir para a redução dos custos das obras, gerando benefícios para toda a sociedade.

A ferramenta apresentada, denominada de Sistema para Seleção de Equipamentos de Terraplenagem e Pavimentação (SiSEq) pode auxiliar planejadores de obras rodoviárias e de infraestrutura, de uma forma geral, na escolha da frota de equipamentos para os serviços de terraplenagem e de pavimentação.

O usuário informa as características do serviço, e, como resultado, o sistema determina a produção dos equipamentos, dimensiona o número de unidades necessárias para a realização do serviço e apresenta os custos de produção correspondentes.

O sistema também gera composições de custos unitários no formato apresentado pelo Sistema de Custos Rodoviários (SICRO) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

O usuário pode analisar os resultados para equipamentos específicos ou para todos os equipamentos cadastrados na base de dados do sistema, podendo ainda cadastrar novos modelos de equipamentos.

O trabalho teve como motivação a realidade evidenciada na maioria das construtoras da área de infraestrutura, que tendem a utilizar os mesmos equipamentos em todas as obras, apesar de estes corresponderem a uma grande parcela do custo total.

Segundo Abram (2001), os equipamentos apresentam mais relevância sobre o orçamento de uma obra do que os materiais e a mão de obra.

Somente na construção da ferrovia Transnordestina mais de 1.700 equipamentos foram mobilizados nos picos dos trabalhos (M&T, 2011), o que significa um montante considerável em termos de custos, corroborando a importância dos equipamentos.

É importante destacar também que cada obra tem suas particularidades e que existem vários tipos e modelos de equipamentos no mercado, não sendo coerente utilizar os mesmos equipamentos em todas as obras. O ideal seria realizar estudos de alternativas para considerar a possibilidade de se adquirirem novos equipamentos ou até mesmo alugá-los, caso gerem custos de produção menores (ABRAM, 2001).

Espera-se com este trabalho, portanto, oferecer ao tomador de decisão uma ferramenta que permita analisar as diferentes alternativas de utilização de equipamentos e escolher aquela que melhor lhe convier.

1.2. PROBLEMA DA PESQUISA

Considerando a constatação de que a seleção de equipamentos para obras rodoviárias é limitada ou até mesmo inexistente na maioria das empreiteiras, apesar da importância dessa atividade de planejamento para a estimativa precisa de custos, o problema de pesquisa desta Dissertação pode ser destacado por meio da seguinte questão: *Como selecionar equipamentos para obras rodoviárias de modo a minimizar os custos de produção e atender a restrições de prazo?*

1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho são:

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um SAD para auxiliar no processo de seleção de equipamentos em obras de construção rodoviária.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- a) conhecer o estado da arte e o estado da prática da seleção de equipamentos de terraplenagem e pavimentação;
- b) desenvolver o SAD proposto;
- c) coletar dados necessários à implementação do SAD proposto;
- d) aplicar o SAD desenvolvido a um exemplo como forma de validação.

1.4. ETAPAS DA PESQUISA

Para se alcançar os objetivos desta pesquisa, as seguintes etapas tiveram que ser realizadas:

- a) revisão bibliográfica;

- b) projeto do SAD proposto;
- c) coleta de dados;
- d) implementação do SAD;
- e) aplicação e teste do SAD;
- f) análise e discussão dos resultados;
- g) elaboração do texto da Dissertação.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, organizados de forma a se apresentar os resultados de cada etapa listada no item anterior.

No Capítulo 1 (INTRODUÇÃO), apresentam-se o contexto que motivou a pesquisa, a problemática da seleção de equipamentos em obras de construção rodoviária, os objetivos do trabalho, a metodologia empregada na pesquisa e o detalhamento da estrutura da Dissertação.

A revisão bibliográfica desta pesquisa está contemplada nos capítulos 2 e 3.

No Capítulo 2 (EQUIPAMENTOS E SUAS APLICAÇÕES), apresentam-se os principais tipos de equipamentos existentes e suas aplicações em obras rodoviárias.

No Capítulo 3 (SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS), discorre-se sobre a prática da seleção de equipamentos e sua problemática e sobre os fatores que afetam a seleção de cada tipo de equipamento, em especial sobre dois parâmetros decisivos para a escolha dos equipamentos: produção e custo de produção.

No Capítulo 4 (DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO), apresentam-se os resultados das etapas de coleta de dados e de desenvolvimento do SAD. O sistema desenvolvido é apresentado desde a sua concepção até as dificuldades encontradas no curso de seu desenvolvimento.

No Capítulo 5 (APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO), é apresentado um exemplo de aplicação do SAD como forma de validação. O procedimento para utilização do sistema é apresentado em paralelo à memória de cálculo do exemplo. O objetivo deste capítulo é mostrar a eficácia do sistema desenvolvido. Fazem-se ainda a análise e a discussão dos resultados gerados pelo sistema.

No Capítulo 6 (CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES), apontam-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento desta pesquisa, destacando-se as dificuldades encontradas e as potencialidades do SAD desenvolvido. Recomendações para pesquisas futuras também são apresentadas neste Capítulo.

CAPÍTULO 2

EQUIPAMENTOS E SUAS APLICAÇÕES

Neste Capítulo, inicialmente, são apresentadas as principais características de obras rodoviárias para compreender o contexto desta pesquisa. Em seguida, apresentam-se os tipos e as aplicações dos equipamentos mais utilizados em obras rodoviárias e em serviços de terraplenagem, de uma forma geral.

2.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE OBRAS RODOVIÁRIAS

As obras rodoviárias apresentam duas características notáveis: (i) forte incidência da utilização de equipamentos, com pouca relevância dos materiais e do pessoal, visto que os equipamentos são imprescindíveis para a execução dos serviços de terraplenagem e de pavimentação (ABRAM, 2001); e (ii) intensa movimentação de materiais, como aponta Lima (2003), segundo o qual terraplenagem e pavimentação correspondem à maior parcela no valor total da obra, “[...] principalmente devido ao transporte de grandes massas de solo ao longo de, muitas vezes, até milhares de quilômetros numa mesma obra”.

Os serviços de terraplenagem são imprescindíveis em qualquer obra de construção civil, como estradas, ferrovias, barragens, aeroportos e edificações. A literatura cita exemplos desses serviços em obras da Idade Antiga, como a construção da Estrada de Semíramis, estrada mais antiga de que se tem conhecimento, que ligava Babilônia a Agbatana, e a Via Apia romana, cuja construção data do ano 312 a.C. (ABRAM e ROCHA, 2009). Citam-se ainda a construção dos canais de irrigação nos rios Nilo e Eufrates, a construção das pirâmides egípcias e a construção de estradas e aquedutos romanos (RICARDO e CATALANI, 2007).

A terraplenagem pode ser definida como segue:

- a) terraplenagem é o “conjunto de operações de escavação, carga, transporte, descarga, compactação de solos, aplicadas na construção de aterros e cortes, dando à superfície do terreno a forma projetada para construção de rodovias” (DNER, 1997, p. 265);

- b) “conjunto de operações destinadas ao corte, carregamento, transporte, descarregamento, acabamento de superfície, umedecimento e compactação de materiais em uma obra de construção civil, objetivando adequar o terreno natural às especificações de projeto (PRATA *et al.*, 2007, p.2)”;
- c) o termo “terraplenagem”, ou “movimento de terra”, pode ser definido como “o conjunto de operações necessárias à remoção do excesso de terra para locais onde esteja em falta, tendo em vista um determinado projeto a ser implantado (RICARDO e CATALANI, 2007)”;
- d) “terraplenagem é arte de se mudar a configuração do terreno (ABRAM e ROCHA, 2009)”.

Qualquer serviço de terraplenagem pode ser dividido em quatro operações básicas, que se repetem através do tempo constituindo o ciclo de operação: (1) escavação (ou corte); (2) carga; (3) transporte; e (4) descarga e espalhamento.

A escavação consiste no rompimento da compacidade natural do solo através de ferramentas cortantes para desagregar o material e tornar possível seu manuseio.

A carga é o enchimento de uma caçamba ou o acúmulo de material na frente de uma lâmina, e o transporte é a movimentação do material do ponto de corte até o seu destino final.

A descarga e o espalhamento consistem na execução do aterro propriamente dita. Outras operações são necessárias para a finalização do aterro, como o umedecimento e a compactação.

Em tempos remotos, a terraplenagem era executada manualmente ou com auxílio de animais, que tracionavam instrumentos rudimentares. Os equipamentos modernos que se conhecem atualmente, geralmente chamados de equipamentos de construção pesada, surgiram somente no início do século XX, quando do advento do trator de esteiras provido de motor diesel (RICARDO e CATALANI, 2007).

Atualmente, há vários tipos, modelos e fabricantes de equipamentos. Em alguns

casos, um único equipamento pode executar isoladamente as quatro operações básicas supracitadas, como o *motoscraper*, por exemplo, diferentemente de uma escavadeira, que apenas realiza a escavação e a carga do material, necessitando de caminhões para transportar o material escavado até seu destino final.

Assim como a terraplenagem, a pavimentação também consiste em um conjunto de operações de movimentação de materiais, necessárias à execução das diferentes camadas da estrutura de um pavimento, de forma que é possível identificar vários fluxos de materiais em uma mesma obra, transportados entre zonas de corte, de aterro, bota-fora, ocorrências (jazidas e empréstimos) e usinas de mistura.

Outra característica notável de obras rodoviárias, também citadas por ABRAM (2001), é o forte impacto que as chuvas exercem sobre o ritmo daquelas, que se reflete na produção dos equipamentos.

2.2. EQUIPAMENTOS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO

Neste trabalho, adota-se a proposta de CHAVES (1955), *apud* RICARDO e CATALANI (2007), que classifica os equipamentos de terraplenagem em: unidades de tração (tratores); unidades escavo-empurradoras; unidades escavotransportadoras; unidades escavocarregadoras; unidades aplainadoras; unidades de transporte; unidades compactadoras.

A seguir, descrevem-se os tipos de equipamentos listados, bem como suas principais aplicações em obras rodoviárias.

Ressalte-se que os equipamentos supracitados são utilizados nos serviços de terraplenagem propriamente ditos e na execução das outras camadas de um pavimento rodoviário, ou seja, são equipamentos utilizados em qualquer serviço de movimentação de material que envolva corte/escavação, carga, transporte, espalhamento, regularização e compactação.

2.2.1. Unidades de tração (trator)

Trator é “a unidade autônoma que executa a tração ou empurra outras máquinas

e pode receber diversos implementos destinados a diferentes tarefas (RICARDO e CATALANI, 2007, p. 43)”.

A unidade de tração é a máquina básica de terraplenagem, a partir da qual derivam outros tipos de equipamentos, que são tratores modificados ou adaptados para realizar diferentes tarefas (RICARDO e CATALANI, 2007).

Os tratores podem ser montados sobre esteiras ou sobre pneumáticos, constituindo os tratores de esteiras e os tratores de pneus, respectivamente.

São características básicas dos tratores:

- a) esforço trator - é a força que o trator possui na barra de tração (no caso de tratores de esteiras) ou nas rodas motrizes (no caso de tratores de pneus) para executar suas funções;
- b) velocidade - é a velocidade de deslocamento da máquina, que depende essencialmente se a máquina é provida de esteiras ou de pneus;
- c) aderência - é a capacidade de o trator deslocar-se sobre uma superfície, sem patinar;
- d) flutuação - é a característica que o trator tem de deslocar-se sobre terrenos de baixa capacidade de suporte, sem o afundamento excessivo da esteira ou dos pneus;
- e) balanceamento - é a qualidade que o trator deve possuir devido a uma boa distribuição de massa e a um centro de gravidade baixo para lhe garantir boas condições de equilíbrio sob as diversas condições de trabalho.

Os tratores de esteiras e os tratores de pneus têm características distintas, conforme sintetizado na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Características dos tipos de tratores.

Característica	Trator de esteiras	Trator de pneus
esforço trator	elevado	elevado, limitado pela aderência
Velocidade	baixa (< 10 km/h)	alta (< 70 km/h)
Aderência	boa	Sofrível
Flutuação	boa	regular a má
Balanceamento	bom	bom

Fonte: RICARDO e CATALANI (2007).

Pela Tabela 2.1, verifica-se que as máquinas de esteiras apresentam maiores vantagens quando comparadas às máquinas de pneus. A melhor aderência e a melhor flutuação dos tratores de esteiras são explicadas pela menor pressão de contato com o terreno, o que faz com que esse tipo de máquina apresente melhor desempenho sobre terrenos de baixa capacidade de suporte. A principal desvantagem das máquinas de esteiras, no entanto, é a baixa velocidade, que resulta em menor rendimento das mesmas.

As máquinas de esteiras são ideais para trabalhos pesados, em que a topografia do terreno é bastante acidentada, com rampas de grande declividade, e em casos de baixa capacidade de suporte e de aderência do terreno. Quando esses casos não ocorrem, pode-se fazer uso da maior vantagem das máquinas de pneus, que é a velocidade.

Atualmente, os fabricantes de equipamentos vêm concebendo vários dispositivos para aumentar a competitividade das máquinas de pneus e permitir que elas possam ser utilizadas sob quaisquer condições (RICARDO e CATALANI, 2007).

2.2.2. Unidades escavo-empurradoras

Estas unidades consistem em tratores equipados com lâminas, chamados de tratores de lâmina ou *dozers*, que podem ser montados sobre esteiras (Figura 2.1) ou sobre pneus (Figura 2.2) e escavam e transportam o material acumulado à frente da lâmina empurrando-o para frente.



Figura 2.1: Trator montado sobre esteiras. Fonte: CATERPILLAR (2012a).



Figura 2.2: Trator montado sobre pneus. Fonte: CATERPILLAR (2012b).

A lâmina é sustentada por braços laterais, um de cada lado, fixados no chassi, e sua estrutura básica é composta por quatro partes: lâmina, facas da lâmina, cantos da lâmina e braços laterais. As facas e os cantos da lâmina são removíveis para que possam ser substituídos quando do desgaste acentuado pela abrasão causada pelos materiais escavados.

Segundo Ricardo e Catalani (2007) e Peurifoy *et al.* (2011), as lâminas podem executar diferentes tipos de movimentos, o que permite classificá-las em:

- a) *bulldozer* - quando a lâmina é reta ou fixa, perpendicular à direção de deslocamento da máquina. Este tipo escava e empurra o material apenas para frente;

- b) *angledozer* - quando a lâmina pode ser angulada, ou seja, formar ângulos diferentes de 90° com o eixo da direção de deslocamento da máquina (Figura 2.3), o que permite escavar e formar uma leira contínua lateralmente, na direção de deslocamento da máquina. Por essa razão, este tipo é ideal para escavação em meia-encosta, pois, realiza a compensação lateral ao mesmo passo que escava o material;
- c) *tilt-dozer* - quando a lâmina, movimentando-se em seu plano vertical, pode inclinar-se lateralmente e ficar com extremidades em níveis diferentes (Figura 2.4);
- d) *tip-dozer* - quando a lâmina pode tombar, variando seu ângulo de ataque em relação ao solo.

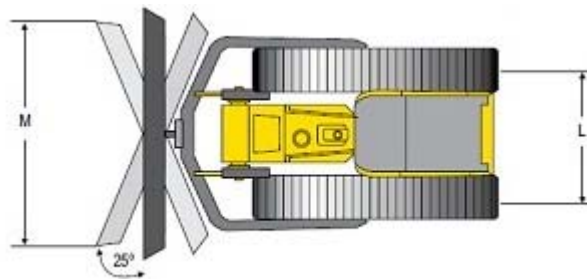


Figura 2.3: *Angledozer*. Fonte: NEW HOLLAND (2012a).

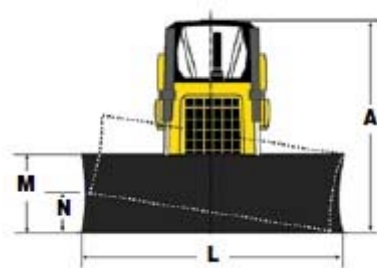


Figura 2.4: *Tilt-dozer*. Fonte: NEW HOLLAND (2012b).

Existem também lâminas especiais denominadas de placas de empuxo ou placas para *push*, que são acessórios utilizados para empurrar *motoscrapers* convencionais durante a operação de corte/carregamento. Consistem em placas menores, reforçadas e equipadas com amortecedores para aliviar o impacto durante a acoplagem aos *motoscrapers*. Na ausência de placas *push*, podem ser utilizadas as lâminas comuns de tratores, desde que reforçadas com chapas de aço (ABRAM e ROCHA, 2009).

Conforme Ricardo e Catalani (2007), Nunnally (2011) e Peurifoy *et al.* (2011), os tipos de lâminas mais comuns são:

- a) lâmina U (*Universal blade*) - possui a forma de U (Figura 2.5), o que reduz a perda lateral de material durante a escavação. É apropriada para movimentação de grandes cargas a grandes distâncias e para movimentar materiais leves e de baixa capacidade de suporte. Pode executar movimentos de inclinação lateral e de tombamento;
- b) lâmina S (*Straight blade*) - lâmina reta (Figura 2.6), apropriada para escavação de materiais com peso específico elevado e empregável na operação de *pusher* por possuir menores dimensões. Pode executar movimentos de inclinação lateral e de tombamento;
- c) lâmina A (*Angle blade*) - lâmina angulável, apropriada para escavações em meia-encosta, abertura de caminhos de serviço e de valetas, reaterro, etc. Pode formar um ângulo de até 25° com a perpendicular à direção de deslocamento da máquina. Pode executar movimentos de inclinação lateral, mas não movimentos de tombamento, por ser fixada ao trator por meio de uma estrutura em forma de C;
- d) lâmina SU (*Semi-U blade*) - combina as características das lâminas U e S;
- e) lâmina C (*Cushion blades*) - lâmina amortecedora, usada em tratores de grande porte para o empuxo de *motoscrapers*. Possui menores dimensões, quando comparada às lâminas S e U, para facilitar a manobra de acoplagem aos *motoscrapers* e reduzir danos aos pneus destes. Este tipo tem seu uso limitado

somente a empurrar material, sem escavá-lo, e não pode ser angulada nem executar movimento de inclinação lateral nem de tombamento.



Figura 2.5: Lâmina U. Fonte: PANABAR (2012).



Figura 2.6: Lâmina S. Fonte: XGGM-MACHINE (2012).

Os tratores de lâminas podem ser equipados com outros acessórios, como o escarificador ou *ripper* (Figura 2.7), que é acoplado à parte traseira e é composto por um ou mais dentes reforçados, utilizado para romper solos mais compactos antes da escavação com a lâmina. Adiante, citam-se outros acessórios utilizados em operações de limpeza de terreno.



Figura 2.7: Trator de lâmina com escarificador acoplado à parte traseira. Fonte: HEAVY EQUIPMENT FORUMS (2012a).

As principais operações executadas pelos tratores de lâmina são: limpeza de terreno, remoção de pedras, escarificação, corte (escavação), transporte a pequena distância, desatolamento de máquinas, *pusher* para *motoscrapers* convencionais, tração de *scrapers* rebocados, abertura de caminhos de serviço, execução de compensação lateral em seção mista (meia-encosta), espalhamento de materiais, abertura de valetas e acabamento de taludes de corte.

Os tratores de esteiras são essenciais nas operações de limpeza de terreno. Para essas operações, Ricardo e Catalani (2007) apresentam como recomendações o uso de estruturas metálicas para proteger as máquinas e o uso de máquinas com potência e custos de aquisição compatíveis com o porte da obra, devido à exigência de esforços elevados e variados no motor.

Podem ser utilizados acessórios como correntes, lâmina desmatadora, lâmina angulável, empurrador de árvores, destocador e ancinho, que facilitam o desmatamento e destocamento (RICARDO e CATALANI, 2007).

Quanto à escavação e ao transporte de massas, para Abram e Rocha (2009), os tratores de esteiras podem ser utilizados para distâncias de até 60m e são ideais para distâncias de até 20m, a partir da qual, o rendimento deste tipo de equipamento é bem reduzido.

“Sempre que a distância entre os centros de massa de corte e aterro for pequena (inferior a 50m), a execução da terraplenagem de pequenos volumes deve ser feita com trator de esteiras, que conduz a preços unitários bastante baixos, se comparados com os outros equipamentos (RICARDO e CATALANI, 2007, p. 248)”.

Para Peurifoy *et al.* (2011), grandes tratores de lâmina podem ser usados em distâncias de até 90m (300pés), de forma que a distância de transporte econômica decresce com o tamanho do trator e depende do tipo de material movimentado.

Os tratores de pneus, por sua vez, podem ser utilizados em pequenas tarefas, como carregamento de pequenas carretas e de grades de discos e no desatolamento de caminhões (ABRAM e ROCHA, 2009).

2.2.3. Unidades escavotransportadoras

Estas unidades escavam, carregam, transportam e descarregam materiais a distâncias que variam de médias a longas (RICARDO e CATALANI, 2007; NUNNALLY, 2011).

Ricardo e Catalani (2007) classificam-nas em dois tipos: *scraper* rebocado e *scraper* automotriz ou *motoscraper*.

O *scraper* rebocado consiste em uma caçamba montada sobre um ou dois eixos com pneumáticos, tracionada geralmente por trator de esteiras. A conexão entre os equipamentos dá-se por meio de engate, e há possibilidade de rebocar-se mais de um *scraper* conjuntamente (configuração em *tandem*) (NUNNALLY, 2011).

As figuras 2.8, 2.9 e 2.10 apresentam exemplos de *scrapers* rebocados.



Figura 2.8: *Scraper* de um eixo rebocado por trator de esteiras. Fonte: AGATTACH (2012).



Figura 2.9: *Scraper* de dois eixos rebocado por trator de esteiras. Fonte: HEAVY EQUIPMENT (2012a).



Figura 2.10: *Scraper* rebocado por trator de rodas (*tandem*). Fonte: DEERE (2012).

O *scraper* escava e carrega-se ao mesmo tempo. A parte inferior da caçamba é abaixada ao mesmo passo que o avental move-se para cima. À medida que o *scraper* desloca-se para frente, a lâmina de corte na parte inferior da caçamba corta o solo, que é empurrado para dentro da caçamba. Após o enchimento da caçamba, o avental e a lâmina são fechados, e o transporte é iniciado. Durante a descarga, a parte inferior da caçamba é aberta sem entrar em contato com o solo, e um ejetor empurra o material para fora.

O princípio de funcionamento do *motoscraper* (Figura 2.11) é o mesmo do *scraper* rebocado. A diferença é que no *motoscraper* a caçamba possui apenas um eixo e é ligada, por meio do pescoço, a um rebocador (trator ou cavalo), de um ou dois eixos.

Este tipo de equipamento, apesar de possuir motor próprio, não possui esforço trator suficiente para carregar-se em tempo razoável e necessita do auxílio do trator, que pode ser de pneus ou de esteiras, para empurrá-lo até que se complete a carga e ele possa iniciar o movimento até o ponto de descarga do material (RICARDO e CATALANI, 2007; ABRAM e ROCHA, 2009).



Figura 2.11: *Motoscraper* convencional. Fonte: HEAVY EQUIPMENT UPDATES (2012).

Para eliminar a necessidade de *pusher*, foram concebidos pelos fabricantes os *motoscrapers* denominados de “autocarregáveis”, cujos tipos podem ser encontrados na literatura:

- a) *motoscrapers* com motor traseiro;
- b) *motoscrapers* com esteira elevatória;
- c) *motoscrapers* com trado helicoidal;
- d) *push-pull scrapers*.

Os *motoscrapers* com motor traseiro (Figura 2.12), como o próprio nome sugere, possuem dois motores, sendo um na parte dianteira e outro na parte traseira, e tração nas quatro rodas.



Figura 2.12: *Motoscraper* com motor traseiro. Fonte: WIKIMEDIA (2012).

Os *motoscrapers* com esteira elevatória (Figura 2.13) possuem mecanismo dotado de palhetas acionadas por motores hidráulicos ou elétricos, que empurram o material para o interior da caçamba à medida que o solo é cortado, aliviando o corte.



Figura 2.13: *Motoscraper* com esteira elevatória. Fonte: ELKINS MACHINERY (2012).

Os *motoscrapers* com trado helicoidal (Figura 2.14) possuem mecanismo que alivia o corte e auxilia na elevação do material cortado para o interior da caçamba.



Figura 2.14: *Motoscraper* com trado helicoidal. Fonte: BAU FORUM (2012).

Os *push-pull* (empurra e puxa, em português) *scrapers*, na verdade, não constituem um tipo específico de *scraper*. Consistem em uma operação combinada de dois *motoscrapers* com motor traseiro, que se acoplam um ao outro durante o carregamento. Enquanto um é carregado, o outro atua como *pusher*, e vice-versa. Após a carga dos dois, eles se separam, e cada um segue sua viagem até o destino de descarga do material.

No geral, quanto à escavação e ao transporte de massas, Abram e Rocha (2009) afirmam que os *motoscrapers* apresentam boa produção para distâncias de 100m a 1.000m e são ideais para distâncias entre 200m e 500m.

Peurifoy *et al.* (2011) apresentam uma faixa de aplicação semelhante, que varia de 500pés (cerca de 150m) a 3.000pés (cerca de 900m), com possibilidade de uso em distâncias de até 1milha (cerca de 1.600m).

No caso dos *scrapers* rebocados, Peurifoy *et al.* (2011) afirmam que estes mostraram-se eficientes em distâncias menores do que 600pés (cerca de 180m).

O campo de aplicação mais apropriado para cada tipo de *scraper*, que varia basicamente em função da distância de transporte, da topografia do terreno e das condições da superfície de rolamento, foi apresentado por Ricardo e Catalani (2007) e

complementado por outros autores, conforme se segue.

2.2.3.1. *Scraper rebocado*

Este tipo de *scraper* é ideal para:

- a) curtas distâncias;
- b) terrenos compactos;
- c) rampas acentuadas ($> 30\%$);
- d) terrenos de capacidade de suporte baixa e alta resistência de rolamento.

Este tipo apresenta menores custos iniciais e de operação do que um *motoscraper* convencional (NUNNALLY, 2011).

2.2.3.2. *Motoscraper convencional com rebocador de um eixo*

Este tipo é ideal para:

- a) distâncias curtas a médias;
- b) terrenos pouco ou medianamente compactos;
- c) rampas médias ($< 15\%$);
- d) terrenos de bom suporte e baixa resistência de rolamento.

2.2.3.3. *Motoscraper convencional com rebocador de dois eixos*

Este tipo pode ser aplicado para:

- a) distâncias médias a altas;
- b) terrenos pouco ou medianamente compactos;
- c) rampas de pequena declividade;
- d) terrenos de bom suporte e baixa resistência de rolamento.

Os *motoscrapers* convencionais com um motor tornam-se antieconômicos para rampas maiores que 5%, quando carregados, e maiores que 12%, quando descarregados (PEURIFOY *et al.*, 2011).

2.2.3.4. *Motoscraper com motor traseiro*

- a) distâncias médias;
- b) terrenos compactos;
- c) rampas de declividade média a forte (< 30%);
- d) terrenos de capacidade de suporte baixa e alta resistência de rolamento.

Este tipo apresenta custo inicial de aproximadamente 25% maior que os *motoscrapers* convencionais e, por essa razão, são utilizados em condições com rampas acentuadas e superfícies com baixa resistência (PEURIFOY *et al.*, 2011).

2.2.3.5. *Motoscraper com esteira elevatória*

Este tipo é ideal para:

- a) distâncias curtas a médias;
- b) terrenos pouco compactos/solos soltos;
- c) rampas de pequena declividade;
- d) terrenos de bom suporte e baixa resistência de rolamento.

Este tipo apresenta como desvantagens o peso morto decorrente da esteira elevatória, que dificulta o transporte a grandes distâncias, e a impossibilidade de escavar materiais rochosos também devido à esteira (NUNNALLY, 2011; PEURIFOY *et al.*, 2011).

2.2.3.6. *Motoscraper com trado helicoidal*

Este tipo é apropriado para operar em condições severas, como na escavação de

material rochoso e de materiais granulares.

Assim como os *motoscrapers* com esteira elevatória, este tipo apresenta como desvantagem o peso morto decorrente do trado helicoidal.

2.2.3.7. Push-pull scraper

A combinação *push-pull* é apropriada para longas distâncias e caminhos de serviços retilíneos (NUNNALLY, 2011).

Esta combinação exige mais equipamentos de compactação e de espalhamento, visto que os dois *motoscrapers* envolvidos descarregam praticamente ao mesmo tempo (PEURIFOY *et al.*, 2011).

Convém salientar que, no entanto, conforme pôde ser visto acima, os autores não quantificaram os parâmetros utilizados para definir as condições ideais de aplicação de cada tipo de equipamento, com exceção das rampas, para as quais, apresentaram valores limitantes de inclinações.

2.2.4. Unidades escavocarregadoras

Este tipo de unidade basicamente escava e carrega o material, que é transportado por outro equipamento até seu destino final.

Compreende as carregadeiras, também chamadas de pás-carregadeiras, e as escavadeiras, também chamadas de pás-mecânicas.

2.2.4.1. Carregadeiras

As carregadeiras consistem em tratores adaptados com uma caçamba frontal articulada a dois braços laterais de levantamento, acionados por dois pistões de elevação de duplo efeito, alimentados por uma bomba hidráulica de alta pressão (RICARDO e CATALANI, 2007).

Estes equipamentos podem ser montados sobre esteiras (Figura 2.15) ou sobre pneus (Figura 2.16), são muito versáteis e trabalham com intensa movimentação,

deslocando-se até a unidade transportadora.



Figura 2.15: Carregadeira de esteiras. Fonte: VIA RURAL (2012).



Figura 2.16: Carregadeira de pneus. Fonte: CATERPILLAR (2012c).

Em geral, as carregadeiras são utilizadas no carregamento de materiais desagregados ou em pequenas escavações de materiais pouco resistentes (ABRAM e ROCHA, 2009).

RICARDO e CATALANI (2007) listam as principais aplicações dos dois tipos de carregadeiras:

- a) carregadeiras de esteiras: são indicadas para operarem em locais com limitações de espaço, por conseguirem girar sobre si, sem grandes dificuldades. Podem

também ser utilizadas em escavações com grandes distâncias de transporte, com auxílio de caminhões, e ainda, em abertura de valas rasas, espalhamento de terra, remoção de matacões de rocha, raízes e vegetal, transporte de materiais a curta distância, carregamento de rocha fraturada, etc.;

- b) carregadeiras de pneus: apresentam como principal vantagem a sua maior mobilidade, que resulta em maior rendimento e na redução de custos com mobilização em carretas, pois elas podem deslocar-se com esforço próprio a distâncias razoáveis. No entanto, como as demais máquinas montadas sobre pneus, estas apresentam o risco de patinamento dos pneus durante a escavação, em especial quando trabalham sobre terrenos de baixa capacidade de suporte ou excessivamente úmidos. Apresentam, portanto, melhor rendimento no carregamento de materiais desagregados em terrenos firmes, com pouca umidade.

Para sanar as limitações das carregadeiras de pneus, os fabricantes têm concebido novas características a esse tipo de equipamento, como: (1) tração nas quatro rodas para melhorar a flutuação; (2) direção articulada para melhorar a mobilidade em locais de difícil operação; (3) peso próprio elevado para aumentar o peso aderente e melhorar a tração; e (4) montagem do motor na parte traseira da máquina para servir de contrapeso e melhorar o balanceamento da máquina (RICARDO e CATALANI, 2007).

2.2.4.2. Escavadeiras

Também chamadas de pás-mecânicas, as escavadeiras são equipamentos que apenas escavam e carregam o material, trabalhando paradas e girando sobre si. Também podem ser montadas sobre esteiras ou sobre pneus.

Podem executar diversas operações, de acordo com o tipo de lança, a saber.

- a) lança com pá frontal ou *shovel*;
- b) lança com caçamba de arrasto ou *drag-line*;
- c) lança com caçamba de mandíbulas ou *clam-shell*; e

d) lança restroescavadora, *back-shovel*, *retro-shovel* ou *hoe*.

Existem ainda outros tipos de implementos como garfo (semelhante à caçamba de mandíbulas), bate-estacas, guindaste, martelo rompedor, dentre outros, que, na maioria das escavadeiras, podem ser substituídos com a troca de lança e de alguns acessórios (ABRAM e ROCHA, 2009).

A seguir, apresentam-se os quatros tipos básicos de escavadeiras, classificados conforme os quatro tipos de lança supracitados, bem como suas aplicações.

A escavadeira com caçamba frontal possui a caçamba voltada para cima e escava executando movimentos no sentido de baixo para cima (Figura 2.17). É utilizada para escavar cortes altos, especialmente de materiais rochosos, com taludes situados acima do nível em que a máquina trabalha (RICARDO e CATALANI, 2007; ABRAM e ROCHA, 2009; NUNNALLY, 2011; PEURIFOY *et al.*, 2011).



Figura 2.17: Escavadeira com caçamba frontal. Fonte: AUTOLINE-EU (2012).

A lança da escavadeira *drag-line* (Figura 2.18) é constituída por uma treliça metálica, em cuja extremidade há uma roldana pela qual passa o cabo de elevação da caçamba, acionado pelo cabrestante.



Figura 2.18: Escavadeira *drag-line*. Fonte: HEAVY EQUIPMENT (2012b).

A lança é sustentada pelo cabo, variando seu ângulo entre 25° e 40° , através de articulação, e pode ter seu raio de alcance aumentado com a intercalação de uma seção intermediária.

A escavação dá-se pelo arrastamento da caçamba, através do cabo de arrasto, que é acionado pelo cabrestante.

As escavadeiras *drag-line* trabalham em escavações em níveis abaixo daqueles em que se encontram e são utilizadas geralmente:

- a) na remoção de solos moles, com excesso de umidade e presença de matéria orgânica;
- b) na abertura de valas de grandes dimensões e desde que não haja escoramento;
- c) na abertura de canais de drenagem, de corta-rios e de limpeza de cursos d'água;
- d) em escavações com presença de lençol freático.

São vantagens da *drag-line*: (1) o maior raio de alcance dentre todos os equipamentos de terraplenagem; (2) a possibilidade de carregar as unidades de

transportes fora da zona de escavação, evitando que estas tenham que manobrar sobre a lama (PEURIFOY *et al.*, 2011).

Quanto às desvantagens, a *drag-line* possui força de escavação derivada estritamente do peso próprio de sua caçamba, o que prejudica o controle da operação do equipamento e leva-o, por vezes, a tombar (PEURIFOY *et al.*, 2011).

A lança *clam-shell* (Figura 2.19) é constituída por duas partes móveis, comandadas por cabos que podem se abrir ou fechar como mandíbulas e que possuem superfície de corte ou dentes.

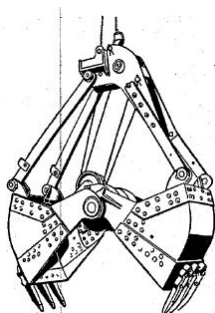


Figura 2.19: Lança *clam-shell*. Fonte: PEURIFOY *et al.* (2011).

A escavação dá-se pela queda da caçamba e, posteriormente, pelo fechamento das mandíbulas, de modo que a escavação avança verticalmente. Por essa razão, as escavadeiras com *clam-shell* (Figura 2.20) são ideais para a abertura de valas de pequenas dimensões com obstáculos, como escoramentos, tubulações subterrâneas, etc.

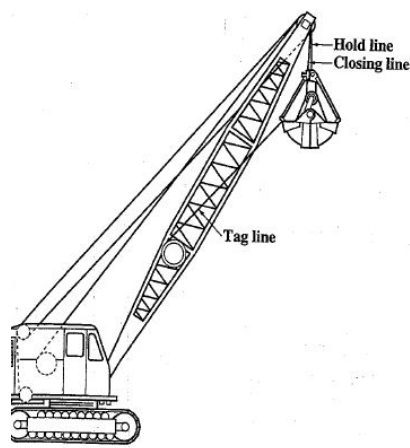


Figura 2.20: Escavadeira *clam-shell*. Fonte: PEURIFOY *et al.* (2011).

A escavadeira com caçamba retroescavadora (Figura 2.21) possui a caçamba voltada para baixo, em direção à cabina da máquina, e, por essa razão, trabalha escavando em níveis situados abaixo daquele em que a máquina se encontra.



Figura 2.21: Escavadeira com caçamba retroescavadora. Fonte: CATERPILLAR (2012d).

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), este tipo de escavadeira é utilizado:

- a) na escavação de valas em grande profundidade e de largura reduzida, sem presença de escoramento;
- b) em cortes de altura elevada;
- c) como equipamento substituto das escavadeira *drag-line* na abertura de canais, na remoção de solos impróprios, dentre outros.

Convém destacar que, no Brasil, este tipo de equipamento é chamado simplesmente de escavadeira hidráulica. Ressalte-se ainda a existência também da chamada retroescavadeira (*backhoe loader*) (Figura 2.22), conhecida por sua versatilidade, que consiste na combinação de três tipos de equipamentos – trator, carregadeira e escavadeira com lança retroescavadora (PEURIFOY *et al.*, 2011).



Figura 2.22: Restroescavadeira. Fonte: CATERPILLAR (2012e).

2.2.5. Unidades aplainadoras

Este tipo de unidade é constituído por um único tipo de equipamento, a motoniveladora, também conhecida como *patrol* (Figura 2.23).



Figura 2.23: Motoniveladora. Fonte: CATERPILLAR (2012f).

Suas principais características são a grande mobilidade e a precisão nos movimentos de sua lâmina, que pode se mover na horizontal, em torno de um eixo

vertical, e até mesmo se inclinar lateralmente, ficando totalmente na vertical. Essa característica da lâmina torna-a ideal para a regularização de taludes.

A motoniveladora é montada sobre seis pneus, sendo duas rodas dianteiras e quatro traseiras em *tandem*, que se adequam às irregularidades do terreno.

As motoniveladoras são especialmente utilizadas em acabamentos, para fazer a conformação final do terreno às cotas de projeto. Conforme Ricardo e Catalani (2007) e Abram e Rocha (2009), são utilizadas: em trabalhos de raspagem, com pequenos transportes; no espalhamento e homogeneização de materiais; na regularização do subleito e de taludes; na abertura de valetas de drenagem; na manutenção de caminhos de serviço; na escarificação leve de terrenos compactos e com teores de umidade muito baixos; e na limpeza da faixa, no caso de vegetação rasteira, sem raízes e tocos.

2.2.6. Unidades de transporte

As unidades de transporte trabalham em conjunto com carregadeiras e escavadeiras e são utilizadas no transporte de massas para grandes distâncias.

São tipos de unidades de transporte:

- a) caminhões basculantes comuns;
- b) vagões;
- c) *dumpers*; e
- d) caminhões fora-de-estrada.

A seguir, apresentam-se as características de cada tipo de unidade de transporte, bem como suas principais aplicações em obras de terraplenagem.

2.2.6.1. Caminhões basculantes comuns

São utilizados no transporte de diversos materiais, como entulho, solos e pedras. A caçamba, também chamada de balança, é adaptada sobre um chassi de caminhão convencional e é feita de aço, sendo reforçada quando utilizada no transporte de rocha.

Estes caminhões possuem estrutura rígida e descarga pela parte traseira da caçamba. Durante a descarga, a parte dianteira da caçamba é levantada por acionamento hidráulico, e o material é despejado por gravidade através de uma abertura na parte traseira da caçamba.

Para Abram e Rocha (2009), o uso eficiente dos caminhões basculantes (Figura 2.24) ocorre para distâncias de transporte superiores a 1.000m, sendo preferencial seu uso em distâncias maiores que 5.000m.



Figura 2.24: Caminhão basculante comum. Fonte: TERRAPLENAGEM (2012).

2.2.6.2. Vagões

São unidades de grande porte, rebocadas por tratores de pneus e cuja descarga pode ser feita por meio de fundo móvel (*bottom-dump*), pela parte traseira da caçamba (*rear-dump*) ou lateralmente (*side-dump*) (RICARDO e CATALANI, 2007).

De acordo com Peurifoy *et al.* (2011), vagões com fundo móvel (Figura 2.25) devem ser usados quando: (1) o material transportado é desagregado; (2) a praça de trabalho não tem interferências; (3) as rampas do caminho de serviço têm inclinação menor que 5%; e (4) o material transportado deve ser espalhado uniformemente ao longo de um percurso.

Esse tipo de vagão é econômico quando grandes quantidades de material precisam ser movimentadas e quando é possível manter os caminhos de serviço em condições razoáveis (PEURIFOY *et al.*, 2011).



Figura 2.25: Vagão com fundo móvel. Fonte: HEAVY EQUIPMENT FORUMS (2012b).

2.2.6.3. Dumpers

Segundo Ricardo e Catalani (2007), os *dumpers* (Figura 2.26) são equipamentos que se assemelham aos caminhões basculantes comuns, porém, diferenciam-se por possuírem estruturas mais reforçadas e assento e volante de direção giratórios, que possibilitam ao operador manobrar o veículo para frente e para trás sempre olhando para frente, o que reduz os tempos de posicionamento do veículo.



Figura 2.26: *Dumper*. Fonte: Fonte: TEREX (2012a).

2.2.6.4. Caminhões fora-de-estrada

São caminhões de grande porte, com estrutura reforçada, rígida ou articulada, e de custo elevado, razões pelas quais são utilizados somente em serviços com condições severas e com movimentação de grandes volumes de materiais, como em atividades de mineração. Por apresentarem grandes dimensões, esses equipamentos não podem trafegar em estradas normais, daí a razão de como são chamados.

Peurifoy *et al.* (2011) estabelecem um paralelo entre os caminhões fora-de-estrada do tipo rígido (Figura 2.27) e do tipo articulado (Figura 2.28):

- a) os articulados são especificamente projetados para operar sobre superfícies de alta resistência de rolamento e em terrenos ásperos, nos quais os rígidos teriam dificuldade de manobrar;
- b) os articulados podem operar em rampas de até 35%, ao passo que os rígidos podem vencer rampas de no máximo 20%, para curtas distâncias, e de 8% a 10%, para longas distâncias;
- c) os caminhões articulados têm baixas capacidade de caçamba e velocidade, que comportam, no máximo, 30 jardas cúbicas (22m³) e atingem 35 milhas por hora (56km/h), respectivamente, enquanto que os rígidos podem apresentar capacidade de até 300 jardas cúbicas (229m³) e velocidades de até 45 milhas por hora (72km/h).

Convém destacar, no entanto, que Peurifoy *et al.* (2011) não esclarecem o significado de curtas e longas distâncias.



Figura 2.27: Caminhão fora-de-estrada rígido. Fonte: TEREX (2012b).



Figura 2.28: Caminhão fora-de-estrada articulado. Fonte: VOLVO (2012).

2.2.7. Unidades compactadoras

Estas unidades constituem os equipamentos destinados à compactação, chamados de rolos compactadores ou, simplesmente, compactadores.

Há vários tipos de compactadores, cujas aplicações são distintas de acordo com o tipo de material a ser compactado, a saber:

2.2.7.1. Rolos pé-de-carneiro

Constam de um tambor cilíndrico oco, feito de chapa de aço, cuja parte externa é dotada de peças metálicas soldadas denominadas de pés-de-carneiro ou patas. As patas são dispostas espaçadas entre si e em fileiras alternadas, de forma que toda a área a ser

compactada seja coberta, e são elas que transmitem a energia de compactação ao solo.

No tambor oco, pode-se acrescentar lastro de água, areia ou pó-de-pedra para aumentar o peso e conseguir-se o grau de compactação exigido. Pode haver mais de um tambor, e o peso desse tipo de rolo varia de 1,5 a 20 toneladas (DNIT, 2010).

Os rolos pé-de-carneiro podem ser estáticos ou vibratórios. Os modelos antigos são rebocados por tratores de pneus, enquanto que os atuais são autopropelidos (RICARDO e CATALANI, 2007).

Este tipo de rolo (Figura 2.29) é utilizado na compactação de solos coesivos, ou seja, com razoável porcentagem de finos (argila e silte) (RICARDO e CATALANI, 2007; ABRAM e ROCHA, 2009).



Figura 2.29: Rolo compactador pé-de-carneiro. Fonte: CATERPILLAR (2012g).

2.2.7.2. Rolos lisos

Os rolos lisos (Figura 2.30) podem ser vibratórios ou estáticos.



Figura 2.30: Rolo compactador liso. Fonte: CATERPILLAR (2012h).

Os rolos lisos vibratórios constam de um tambor cilíndrico de chapa de aço lisa que vibra mediante um eixo excêntrico, aplicando ao solo golpes com dada frequência.

Este tipo é utilizado na compactação de solos arenosos e pedregulhosos (não coesivos) (RICARDO e CATALANI, 2007; ABRAM e ROCHA, 2009).

Quanto a sua operação, é importante controlar o número de passadas, a fim de se evitar que, após certo tempo de compactação, o equipamento venha a receber de volta a vibração aplicada, com sérios prejuízos para sua estrutura e para o sistema vibratório especificamente, e deve-se também evitar a vibração do rolo quando parado, para não provocar o efeito de devolução e esgotamento do solo (DNIT, 2010).

Os rolos lisos estáticos, no entanto, são de pouca aplicação em terraplenagem. O efeito de compactação destes rolos é dado de cima para baixo, o que causa, em certos casos, o aparecimento de uma camada superficial compactada deixando a parte mais profunda parcialmente solta (DNIT, 2010).

2.2.7.3. Rolos pneumáticos

Consistem em uma plataforma apoiada sobre dois eixos com pneumáticos, sendo que o número de pneus é diferente nos dois eixos, de forma que os pneus traseiros cubram os espaços deixados pelos pneus dianteiros (RICARDO e CATALANI, 2007). Podem ser rebocados ou possuir tração própria (DNIT, 2010).

São classificados, segundo DNIT (2010), em leves (9t - 12t), médios (13t - 25t) e pesados (26t - 56t).

É possível variar a pressão de inflação dos pneus através de um compressor montado no chassi. A pressão deve ser tal que não provoque a ruptura do solo.

Há neste tipo de rolo, espaço vazio para a colocação de lastro, mas, para Ricardo e Catalani (2007), o uso do lastro não é vantajoso, pois não aumenta significativamente a pressão de contato.

De acordo com Abram e Rocha (2009), os rolos pneumáticos (Figura 2.31) são apropriados para solos coesivos e arenosos. Segundo DNIT (2010), os rolos pneumáticos são os mais versáteis, podendo ser utilizados desde a compactação de solos coesivos até massas asfálticas, pelas vantagens do efeito de amassamento produzido pelos pneus.

Ricardo e Catalani (2007), além dos três tipos de rolos supracitados, citam os rolos combinados e os rolos especiais. Os rolos combinados, como o próprio nome sugere, consistem na combinação de mais de um tipo de rolo. Como rolos especiais, citam-se os rolos de grade, no qual a chapa lisa é substituída por uma malha quadrada, e rolo de placas, no qual a chapa lisa é substituída por segmentos de placa descontínuos.



Figura 2.31: Rolo compactador pneumático. Fonte: DYNAPAC (2012).

2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentadas as principais características das obras rodoviárias, dentre as quais está a importância do uso dos equipamentos de

terraplenagem e pavimentação.

Foram também apresentados os principais tipos de equipamentos utilizados em obras rodoviárias, bem como suas aplicações nos diversos serviços das obras.

No Capítulo a seguir, será abordado o tema da seleção de equipamentos, apresentando-se o estado da arte e a prática da seleção de equipamentos, com destaque para os fatores que influenciam a escolha das máquinas.

Será apresentado também o método clássico de estimativa da produção dos equipamentos, visto que a produção é na maioria das vezes o principal parâmetro decisivo na escolha das máquinas.

CAPÍTULO 3

SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Neste Capítulo, discute-se sobre a prática da seleção de equipamentos, e apresenta-se o estado da arte acerca do tema.

É dada ênfase para o método determinístico de estimativa de produção de equipamentos e para os custos de produção, visto que, na maioria das vezes, produção e custos são os parâmetros finais de escolha dos equipamentos.

Considerações sobre a locomoção dos equipamentos também são feitas para que se possa entender o processo de estimativa da produção de equipamentos.

3.1. A PRÁTICA DA SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Dadas as particularidades de cada obra e as aplicações distintas dos vários equipamentos disponíveis no mercado, selecionar equipamentos de construção para uma obra consiste em definir os tipos, os modelos e o número de equipamentos ideais, de forma a atender a restrições de custo e/ou de prazo.

A seleção adequada é um dos principais fatores para se atender às exigências de cronograma e de orçamento de uma obra (AMIRKHANIAN e BAKER, 1992). No entanto, usualmente as empresas construtoras não utilizam nenhuma metodologia de seleção ou, quando utilizam, baseiam-se em regras empíricas.

A maioria das empresas depende das experiências obtidas em contratos anteriores e do julgamento de uma equipe de profissionais experientes dos vários setores organizacionais (ALKASS e HARRIS, 1988; AMIRKHANIAN e BAKER, 1992).

Na prática, a tendência natural das construtoras é usar os equipamentos já disponíveis em suas frotas, não considerando nenhuma análise de alternativas (KARSHENAS, 1989). Para Peurifoy e Ledbetter (1985), *apud* Gransberg (1996), essa atitude é o maior risco que os planejadores assumem.

Como alternativa a essa prática, o mínimo que se pode fazer é considerar a opção de alugar outros equipamentos, como afirma Peurifoy (1975), *apud* Gransberg (1996), ou realizar estudos de custos de outros equipamentos não disponíveis na frota, para nortear a compra de novos equipamentos que possam levar à redução dos custos, como recomenda Abram (2001).

A importância desse estudo de alternativas pode ser exemplificada por meio de uma simulação apresentada em M&T (2010). Na simulação em questão, feita em um *software* de propriedade de uma empresa fabricantes de equipamentos, foram avaliados dois cenários de dimensionamento de equipamentos para o caso real de uma obra de infraestrutura. No primeiro cenário, considerou-se a operação de escavadeiras de 70t com caminhões fora-de-estrada com capacidade de carga de 55t, e no segundo cenário, consideraram-se escavadeiras de 85t operando com caminhões fora-de-estrada com capacidade de 90t.

Como resultado, a simulação determinou o número de escavadeiras e de caminhões necessários à execução da obra em prazo determinado para cada cenário, conforme sintetizado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Exemplo de dimensionamento de equipamentos.

	Cenário 1	Cenário 2
Composição da equipe	Escavadeiras de 70t com caminhões com capacidade de 55t	Escavadeiras de 85t com caminhões com capacidade de 90t
Resultado do dimensionamento	43 escavadeiras e 150 caminhões	31 escavadeiras e 93 caminhões
Conclusão da simulação	Custo de produção 17% maior para o cenário 1	

Os resultados mostraram que cenário 1 apresentou custo 17% maior, que significa um montante relevante quando se trata de grandes obras de infraestrutura, confirmando a importância da escolha dos equipamentos sobre o custo total de uma obra.

No entanto, a seleção dos equipamentos não é um processo simples. Não há um padrão, pois as condições a serem analisadas são diferentes para cada obra (M&T, 2010).

Para Ricardo e Catalani (2007), o problema da dificuldade da seleção dos equipamentos está na análise de todos os fatores que exercem influência no comportamento dos equipamentos, pois são vários os parâmetros que precisam ser determinados e, além disso, em muitos casos, mais de uma configuração de frota pode atender às condições vigentes, ficando a escolha final ao arbítrio de critérios pessoais, econômicos e de cronograma.

A seguir, são apresentados os principais fatores que afetam a seleção dos diversos tipos de equipamentos, que segundo Ricardo e Catalani (2007), podem ser classificados em três categorias, conforme segue:

3.1.1. Fatores naturais

Constituem esta categoria: a natureza do solo, a topografia e as condições climáticas.

A natureza do solo, caracterizada pela granulometria, resistência de rolamento, capacidade de suporte, umidade natural, dentre outros parâmetros, influencia basicamente a decisão por optar entre máquinas de esteiras ou de pneus.

Como regra básica, para evitar problemas de afundamento excessivo e de falta de aderência, a utilização de máquinas de pneus deve ser evitada em solos com baixa capacidade de suporte, excessivamente úmidos ou com presença de matéria orgânica e resistências de rolamento muito elevadas.

A topografia, por sua vez, influencia a escolha de um modelo específico de equipamento. É preciso escolher equipamentos que tenham potências compatíveis com a topografia da região. Alguns modelos de caminhões, por exemplo, podem apresentar problemas na subida de rampas se seu esforço motriz não for suficiente para garantir a aderência entre os pneus e o terreno.

As condições climáticas afetam negativamente a produtividade dos equipamentos e, por essa razão, deve ser considerado na escolha dos equipamentos.

3.1.2. Fatores de projeto

Constituem esta categoria: volume de material a ser movimentado e distância de transporte.

O volume de material a ser movimentado é o fator que define o porte do equipamento a ser escolhido: “Basicamente, para volumes pequenos, dever-se-á utilizar equipamentos de pequeno porte, e para volumes significativos, equipamentos de maior porte (ABRAM, 2001)”. Abram (2001), no entanto, não estabelece valores numéricos para caracterizar a magnitude dos volumes movimentados.

A distância de transporte, como ressaltam Ricardo e Catalani (2007), é o principal fator que deve ser considerado na escolha dos equipamentos.

Como regra básica, para pequenas distâncias (menores que 50m), máquinas de esteiras com lâmina são ideais. Equipamentos de pneus, por sua vez, são ideais para distâncias maiores que 50m, pois podem desenvolver maiores velocidades (RICARDO e CATALANI, 2007).

3.1.3. Fatores econômicos

Os equipamentos não podem ser escolhidos somente pela distância de transporte. Outros fatores devem ser considerados. A literatura apresenta faixas de utilização econômica para os diversos tipos de equipamentos.

Após analisar a viabilidade dos equipamentos quanto aos fatores naturais e de projeto, parte-se para a escolha definitiva, que deve ser baseada nos custos.

Para isso, é necessária a estimativa precisa das produções e dos custos dos diversos equipamentos, incluindo custos de propriedade, de operação e de manutenção, para se determinar o custo de produção, conforme definido adiante.

O equipamento ideal será, portanto, aquele que atender a todas às exigências do projeto e oferecer o menor custo de produção e/ou prazo de execução.

A seguir, apresentam-se os fatores que afetam a seleção dos diferentes tipos de

equipamentos, com exceção dos rolos compactadores e motoniveladoras, que não fazem parte do escopo deste trabalho, concentrado na escavação, carga e transporte de materiais.

3.1.4. Seleção de tratores de lâmina

A seleção do trator de lâmina ideal para dado serviço deve considerar primordialmente o tipo de material a ser movimentado e o tipo de serviço. Conforme visto anteriormente, existem vários tipos de acessórios, que devem ser escolhidos de acordo com as necessidades da obra.

3.1.5. Seleção de scrapers

Verifica-se pela Figura 3.1 que a seleção é feita basicamente em função da resistência de rolamento da superfície por onde os equipamentos trafegam e da distância de transporte.

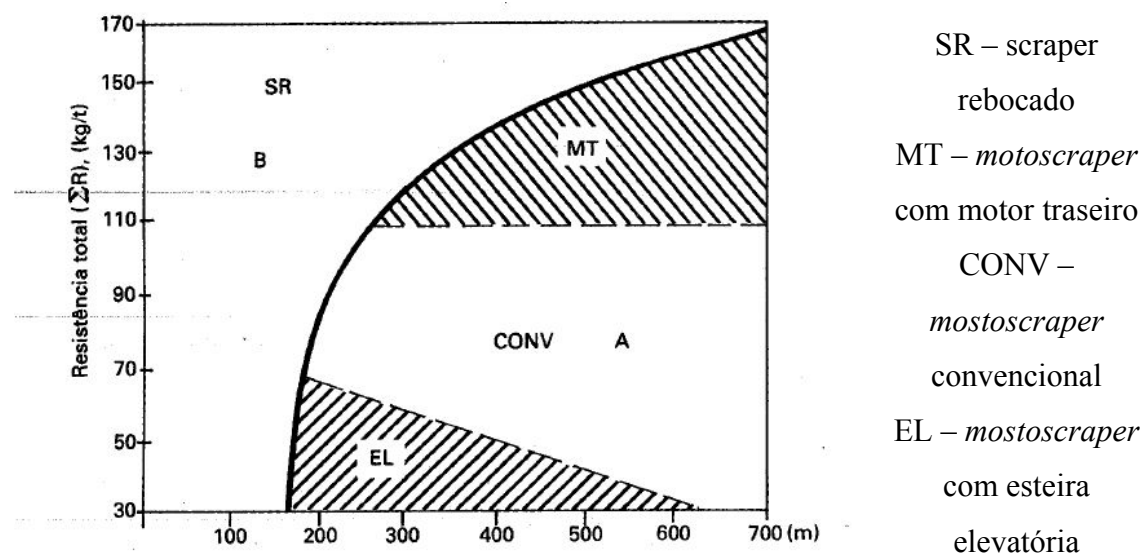


Figura 3.1: Campo de aplicação dos diferentes tipos de scrapers. Fonte: RICARDO e CATALANI (2007).

Tabela 3.2: Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de *scrapers*.

Tipo de <i>scraper</i>		Vantagens	Desvantagens
<i>Scraper</i> rebocado		Menor custo inicial Menor custo de operação Não necessita de <i>pusher</i>	-
<i>Motoscraper</i> convencional	Rebocador de um eixo	Menor custo operacional em terrenos de difícil escavação Menos sujeito a quebras e avarias por sua maior robustez Exige menor habilidade do operador por ter menos componentes frágeis	Não podem ser utilizados para rampas acentuadas
	Rebocador de dois eixos		
<i>Motoscraper</i> autocarregável	Com motor traseiro	Não necessita de <i>pusher</i>	Maior custo inicial
	Com esteira elevatória	Não necessita de <i>pusher</i> Menor custo operacional em terrenos de fácil escavação	Peso morto no transporte Não pode movimentar material rochoso
	Com trado helicoidal	Pode operar em condições severas	Maior custo de propriedade Maior custo de operação Peso morto no transporte
	<i>Push-pull</i>	Não necessita de <i>pusher</i>	Necessita de mais equipamentos de compactação e de regularização

Ricardo e Catalani (2007), Nunnally (2011) e Peurifoy *et al.* (2011) apresentam os campos de aplicação ideais para cada tipo de *scraper* por meio de gráficos como o apresentado na Figura 3.1.

3.1.6. Seleção de carregadeiras

Em Peurifoy *et al.* (2011), podem-se encontrar três fatores básicos que devem ser considerados na escolha de uma carregadeira: (1) o tipo de material a ser movimentado; (2) o volume de material a ser movimentado; (3) a relação entre a altura de despejo e a altura de carregamento da unidade de transporte.

Quanto ao primeiro fator, há um parâmetro importante a ser considerado, chamado de carga de tombamento: em uma mesma carregadeira, podem ser adotadas diferentes capacidades de caçamba. No entanto, o tamanho da caçamba a ser utilizado é limitado pela carga de tombamento da carregadeira, que é especificada pelo fabricante do equipamento, de forma a evitar o tombamento deste quando em operação (RICARDO e CATALANI, 2007; PEURIFOY *et al.*, 2011).

O segundo fator já foi abordado no item *Fatores de projeto*.

O terceiro fator é também citado por El-Moslmani (2002), que o incorporou em sua ferramenta denominada de FLSELECTOR, desenvolvida para auxiliar a escolha de frotas de carregadeiras e caminhões.

Além da compatibilidade entre as alturas de despejo e de carregamento (Figura 3.2), El-Moslmani (2002) também considera a relação entre as capacidades das caçambas dos equipamentos e apresenta a regra empírica segundo a qual a carregadeira deve executar de três a seis ciclos de carga (caçambadas) para encher a caçamba da unidade de transporte.

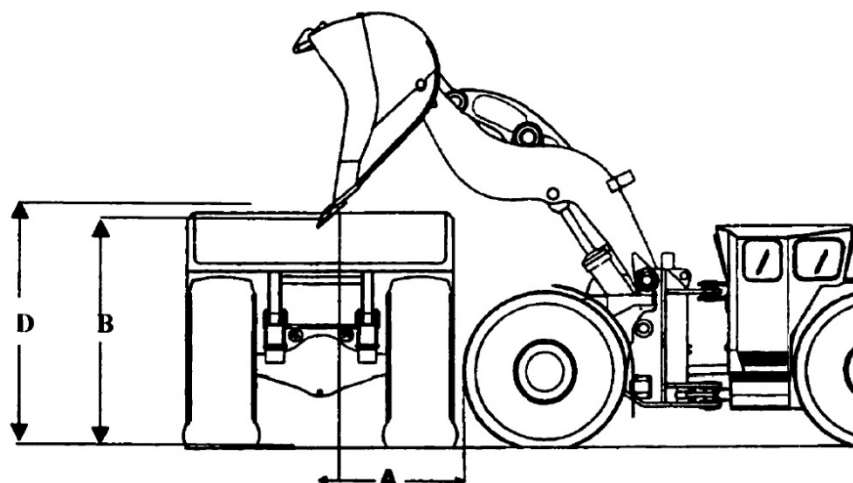


Figura 3.2: Compatibilidade entre a altura de despejo da carregadeira (D) e a altura de carregamento do caminhão (B). Fonte: EL-MOSLMANI (2002).

3.1.7. Seleção de escavadeiras

Para as escavadeiras com caçamba frontal, Peurifoy *et al.* (2011) julgam que dois fatores são fundamentais na escolha: (1) o custo por unidade de volume de material escavado; e (2) as condições do serviço.

Na estimativa do custo por unidade de volume, devem ser considerados o porte do serviço e o custo de mobilização do equipamento, conforme já abordado no item 3.1.2.

Uma grande quantidade de material a ser movimentada pode justificar o uso de equipamentos com maiores custos de propriedade, de operação e manutenção e de mobilização.

Quanto às condições do serviço, deve-se levar em consideração a compatibilidade entre as dimensões da escavadeira e da unidade de transporte, assim como para as carregadeiras.

Nesse aspecto, Peurifoy *et al.* (2011) recomendam que a capacidade da caçamba da unidade de transporte seja aproximadamente o quádruplo da capacidade da caçamba da escavadeira e que a altura de despejo da escavadeira seja compatível com a altura de carregamento da unidade de transporte.

O balanceamento entre o tamanho da caçamba da escavadeira e a capacidade de transporte, segundo aqueles autores, elimina perda de tempo com preenchimentos parciais da caçamba da escavadeira que, por ventura, sejam necessários para completar a carga da unidade de transporte.

3.1.8. Seleção de caminhões

A escolha dos caminhões está geralmente associada à escolha dos equipamentos de escavação e carga.

Nesse contexto, Karshenas (1989) desenvolveu um modelo matemático para minimizar o custo de produção de equipes formadas por carregadeiras e caminhões.

Para estimar a produção das equipes, o autor utiliza conceitos de teoria das filas e, como parâmetro de escolha, além do custo de produção mínimo, é considerada a compatibilidade entre a altura de despejo da carregadeira e a altura de carregamento do caminhão, conforme já abordado.

Para facilitar a análise, o autor apresenta seu modelo por meio de soluções gráficas.

No primeiro gráfico (Figura 3.3), a partir da capacidade em volume de uma dada

carregadeira e do chamado fator de projeto (tempo de ciclo de transporte), dado em minutos, determinam-se a capacidade ideal do caminhão a ser utilizada e o respectivo custo de produção.

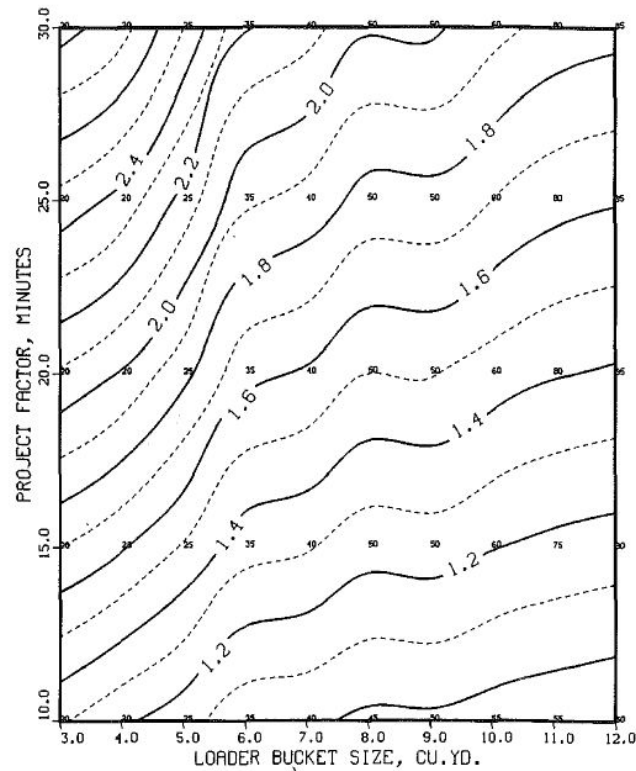


Figura 3.3: Determinação da capacidade do caminhão e do custo de produção.

Fonte: KARSHENAS (1989).

Com o segundo gráfico (Figura 3.4), a partir dos mesmos parâmetros de entrada anteriores, determinam-se o número ideal de caminhões e a respectiva produção da equipe.

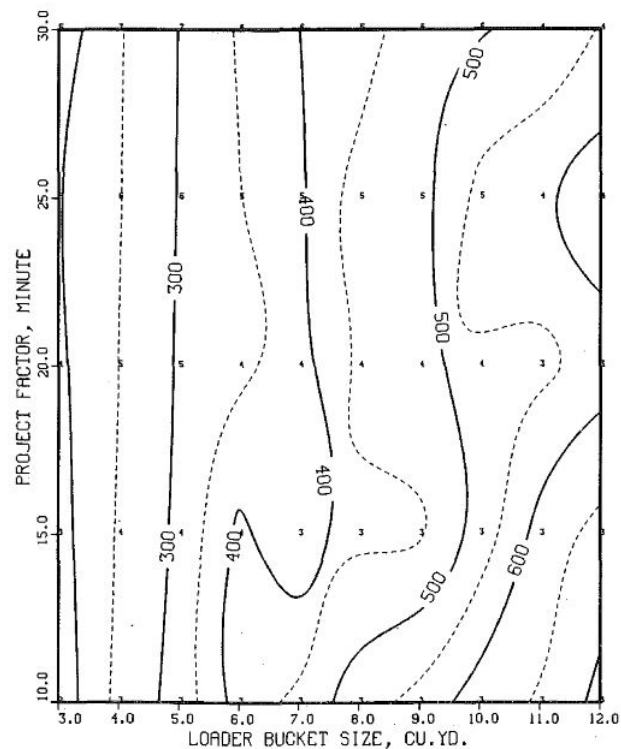


Figura 3.4: Determinação do número de caminhões e da produção da equipe.

Fonte: KARSHENAS (1989).

A capacidade e o número de caminhões determinados por meio dos gráficos para a carregadeira considerada são, portanto, aqueles que minimizam o custo de produção.

Gransberg (1996) apresenta um modelo similar ao de Karshenas (1989), em que foi desenvolvido o parâmetro denominado de CIN (*Cost Index Number*).

De acordo com essa metodologia, o modelo ideal de caminhão para dada carregadeira é determinado a partir do cálculo do CIN para cada modelo de caminhão, que considera o tempo de ciclo de transporte, o número ótimo de caminhões, as capacidades de caçamba da carregadeira e dos caminhões, a quantidade de material a ser movimentada e os custos horários dos equipamentos. Aquele modelo de caminhão que apresentar o menor CIN deverá ser escolhido para operar com a carregadeira considerada.

3.2. ESTADO DA ARTE

A seleção de equipamentos não é um processo simples e ainda pode ser muito laboriosa, como afirmam Amirkhanian e Baker (1992). Na tentativa de mudar esse cenário e melhorar a escolha dos equipamentos, a academia tem apresentado vários trabalhos.

Constata-se que diversas técnicas e ferramentas vêm sendo utilizadas. Há trabalhos que apresentam metodologias para auxiliar a seleção propriamente dita, aplicada a um ou mais tipos de equipamentos, e há outros que concentram o estudo em um ou mais parâmetros que afetam a seleção, como o tempo de viagem das unidades de transporte.

Dentre os trabalhos mais citados, verifica-se que a inteligência artificial foi muito utilizada no desenvolvimento de sistemas especialistas (SE). Como exemplos dessa abordagem, podem ser citados: Alkass e HARRIS (1988); Touran (1990); Amirkhanian e Baker (1992); Alkass *et al.* (1993); Alkass *et al.* (1997); Xie (1997); e Eldrandaly e Eldin (2006).

Em síntese, os SE são ferramentas que interagem com o usuário por meio de uma série de perguntas sobre os dados da obra e, como resultado, recomendam os equipamentos ideais para as condições informadas e determinam produção e custos de produção das equipes.

Como exemplos de dados de entrada nos SE, citam-se: (1) volume de material a ser movimentado; (2) prazo de execução; (3) tipo de solo; (4) características do caminho de serviço; (5) distância de transporte; e (6) condições da praça de trabalho.

Os vários SE existentes diferenciam-se geralmente pelos tipos de equipamentos considerados, pelo algoritmo de análise e pelos parâmetros apresentados como resultados.

O ESEMPS (*Expert System for Earth-moving Plant Selection*), de Alkass e Harris (1988), por exemplo, considera todos os tipos de equipamentos, enquanto que os SE de Touran (1990), de Alkass *et al.* (1997) e de Eldrandaly e Eldin (2006) são

específicos para rolos compactadores, guias e *scrapers*, respectivamente.

Ainda em se tratando de inteligência artificial, outras técnicas têm sido aplicadas, a exemplo dos algoritmos genéticos (HAIDAR *et al.*, 1999; HSIAO *et al.*, 2011; LIMSIRI, 2011), das redes neurais (CHAO, 2001), das redes de Petri (PRATA *et al.*, 2007; CHENG *et al.*, 2011) e da lógica *fuzzy* (MARZOUK e MOSELHI, 2004).

Haidar *et al.* (1999) desenvolveram o programa computacional X SOME, que combina técnicas de sistemas especialistas e de algoritmos genéticos e é aplicado à seleção de equipamentos de escavação e de transporte para atividades de mineração.

O programa foi desenvolvido com o objetivo de minimizar os custos de operação de minas associados aos equipamentos, que, segundo os autores, representam no custo total de operação o montante de 30% a 50% para os equipamentos de escavação e de 15% a 20% para os equipamentos de transporte.

Prata *et al.* (2007) desenvolveram um modelo probabilístico baseado em redes de Petri coloridas para avaliar cenários de utilização de carregadeiras e caminhões. Diferentes quantidades de carregadeiras e de caminhões e seus respectivos custos de produção foram avaliados para o caso real de uma obra rodoviária.

Marzouk e Moselhi (2004) focaram no desenvolvimento de um modelo para a estimativa precisa do tempo de viagem das unidades de transporte, a qual, segundo os autores, é essencial para determinar a produção das equipes de terraplenagem e a escolha definitiva da configuração de frota mais eficiente em termos de custos. Os autores utilizaram lógica *fuzzy* e regressão linear para desenvolver um modelo alternativo aos métodos existentes.

Outra técnica bastante empregada, desde a década de 1960, é a Teoria das Filas, que veio para suprir as limitações de métodos determinísticos de dimensionamento de equipamentos, que consideram os tempos de ciclo dos equipamentos como fixos, em detrimento das incertezas envolvidas nos processos de construção (HALPIN e RIGGS, 1992; EL-MOSLMANI, 2002).

A operação de uma carregadeira com caminhões é um clássico exemplo de um

sistema de filas (HALPIN e RIGGS, 1992), em que a carregadeira é o servidor e os caminhões são os clientes, de acordo com a terminologia empregada na Teoria das Filas (PRADO, 2009).

Nesse contexto, El-Moslmani (2002) e El-Moslmani *et al.* (2002) apresentaram o FLSELECTOR, que é uma ferramenta concebida para auxiliar engenheiros na escolha da combinação ideal de carregadeiras e caminhões para a execução de um serviço de terraplenagem, de forma a atender ao menor custo, à máxima produção ou ao prazo mínimo de execução.

O FLSELECTOR foi desenvolvido utilizando-se *Visual Basic for Application* (VBA) e *Microsoft Excel 2000*.

A partir de dados como tipo de solo a ser movimentado e características do caminho de serviço e de um modelo de carregadeira selecionado pelo usuário, dentre vários constantes em um banco de dados, o FLSELECTOR calcula produção, duração e custo unitário para todos os modelos de caminhões compatíveis com a carregadeira selecionada, listando as dez melhores combinações.

Mayfield (2004) destaca-se por apresentar uma ferramenta de utilização simples para auxiliar a seleção de *scrapers*. O autor gerou uma planilha em *Microsoft Excel* que calcula deterministicamente os custos de produção, o tempo de execução e a produção dos equipamentos para dado serviço. A Figura 3.5 apresenta a interface da planilha de Mayfield (2004).

Scraper Advisory System						
<p style="text-align: center;"> <input type="button" value="Recommend Selection"/> <input type="button" value="View Recommendations"/> <input type="button" value="Add New Scraper"/> </p> <p>Step 1- Select Scraper Model of Your Choice OR Click on the Recommend Selection Button to View the Unit Cost of All Scrapers Available in the Database</p> <p>Pick from Dropdown menu: <input type="text" value="Cat 637G"/></p>						
Step 2- Haul Road Parameters						
	Distance (ft)	Road type (use dropdown menu)	Grade Resistance (%)	Rolling Resistance (%)	TR out	TR in
Segment 1	500	Earth, heavy mud	-2%	12%	10%	14%
Segment 2	800	Earth, poorly maintained		8%	8%	8%
Segment 3	500	Earth, well maintained		4%	4%	4%
Segment 4	600	Earth, well maintained	5%	4%	3%	-1%
Segment 5	600	Earth, well maintained	1%	4%	5%	3%
Segment 6						
Segment 7						
Total	3000					
Step 3- Enter Cycle Time Parameters (use dropdown menus)						
Load Time	Dump Time	Turn time (loaded)	Turn Time (empty)	Acc/Dec (feet)	Load Time	
0.85	0.37	0.21	0.3	200	96%	
Step 4- Operation Parameters						
Soil type (use dropdown menu)		Quantity to be moved				
Clay, wet		100,000				
Step 5- Cost Parameters						
Labor Costs				Equipment Costs		
	Operator (\$/hr)		Add'l people	Machine (\$/hr)		
Efficiency (min/hr)	Scraper	Dozer	Number	Avg \$/hr	Pusher	Alternate \$?
60	12,00	20,00			110,00	150,00
Use Alt. Scraper \$?						
No						
Results						
	Scraper Model	Number of Scrapers	Unit Cost	Total Cost \$	Project Time	
Scrapers controlling	Cat 637G	4	0,68	58,153	101	
Pushers controlling	Cat 637G	5	0,68	68,360	99	

Figura 3.5: Planilha desenvolvida para seleção de *scrapers*. Fonte: MAYFIELD (2004).

Na planilha, há vários modelos de *scrapers* cadastrados. O usuário pode analisar os resultados para um modelo específico ou para todos os modelos, informando as condições do caminho de serviço (material da superfície de rolamento, inclinações das rampas e distâncias de transporte), os tempos fixos na operação dos *scrapers*, o volume de material a ser movimentado e os custos horários dos equipamentos e de mão-de-obra.

É possível encontrar também *softwares* comerciais para a seleção de equipamentos desenvolvidos por fabricantes de equipamentos. Dentre esses, o mais citado é o *Fleet Production and Cost Analysis* (FPC), da Caterpillar®. No entanto, programa como esse, como criticam Marzouk e Moselhi (2004), não estão disponíveis para que a academia possa estudar sua eficácia.

3.3. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Ricardo e Catalani (2007) apresentam um estudo sobre a locomoção dos equipamentos, essencial para compreender o processo de estimativa da produção, pois, em última análise, esta depende do tempo de ciclo dos equipamentos, o qual por sua vez

é função das características dos espaços percorridos e das velocidades de deslocamentos.

A seguir, são apresentadas as principais considerações do estudo supracitado.

3.3.1. Locomoção dos equipamentos

Para estimar as velocidades, é preciso conhecer as forças que impulsionam as máquinas, bem como as forças resistentes ao seu movimento.

O movimento de um equipamento obedece à segunda lei de Newton, segundo a qual:

$$Er - \Sigma R = m \times a \quad (3.1)$$

em que:

Er : esforço trator na roda motriz;

ΣR : somatório das resistências opostas ao movimento (resistência total);

m : massa da máquina;

a : aceleração da máquina.

Pela Equação 3.1, pode-se deduzir que, para que o movimento de um equipamento seja iniciado, o esforço trator tem que ser no mínimo igual às resistências opostas, ou seja, $Er > \Sigma R$, e para que o movimento seja uniforme $Er = \Sigma R$.

As resistências que se opõem ao movimento de um equipamento são classificadas em quatro tipos: (1) resistência de rolamento; (2) resistência de greide ou resistência de rampa; (3) resistência de ar; e (4) resistência de inércia.

A resistência de rolamento pode ser definida como “a força horizontal mínima que deverá ser aplicada ao equipamento para iniciar o movimento sobre uma superfície plana, horizontal, contínua e indeformável (RICARDO e CATALANI, 2007)”.

Essa resistência decorre do atrito gerado nos rolamentos dos eixos e, no caso das máquinas de pneus, também do atrito entre os pneus e o terreno (RICARDO e CATALANI, 2007). É proporcional à pressão exercida pelo peso do equipamento na direção normal ao terreno e é dada pela expressão:

$$RR = K \times P \quad (3.2)$$

em que:

RR: resistência de rolamento (kg);

K: coeficiente de rolamento (kg/t);

P: peso do equipamento (t).

O coeficiente de rolamento depende da natureza da superfície do terreno e pode ser obtido na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Coeficientes de rolamento

Superfície do terreno	Coeficiente de rolamento (kg/t) (máquinas de pneus)
Revestimento em asfalto ou concreto	20
Terra seca e firme	30
Terra seca, solta	40 – 60
Terra seca, arada	80
Aterros sem compactação	80
Areia solta e seca	100
Terra muito úmida e mole	160
Terra argilosa muito úmida	180

Fonte: RICARDO e CATALANI (2007)

A Resistência de Greide (RG) é a componente horizontal da força-peso atuante sobre o equipamento quando este sobe ou desce uma rampa e é dada por:

$$RG = 10 \times P \times i \quad (3.3)$$

em que:

RG : resistência de rampa (kg);

P : peso do equipamento (t);

i : inclinação da superfície de deslocamento (%).

Em aclave, o sinal de i é positivo e, em declive, negativo. Em declive, a força torna-se ativa e é denominada assistência de rampa.

A resistência de ar e a resistência de inércia são desprezíveis, sendo a resistência total (ΣR) dada, portanto, por:

$$\Sigma R = RR + RG \quad (3.4)$$

Substituindo-se os valores de RR (Equação 3.2) e de RG (Equação 3.3) na Equação 3.4, tem-se:

$$\begin{aligned} \Sigma R &= KP + 10 \times P \times i \\ \Sigma R &= P \times (K + 10 \times i) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Uma vez determinada a resistência total, tem-se que o esforço trator (Er) pode ser relacionado à potência e à velocidade de deslocamento do equipamento pelo conceito de potência, segundo o qual:

$$Pot = \frac{T}{t} = \frac{F \times d}{t} = F \times v \quad (3.6)$$

em que:

Pot : potência do equipamento;

T : trabalho realizado pelo equipamento durante o movimento;

t : tempo de deslocamento do equipamento;

F : esforço trator do equipamento;

v : velocidade de deslocamento do equipamento.

Neste caso, a potência é representada pela potência disponível nas rodas motrizes do equipamento (N_r), e a força, pelo esforço trator.

Vale ressaltar que a potência disponível nas rodas motrizes é a potência de desempenho do equipamento (N_0) multiplicada por um fator que considera as perdas por atrito nos mancais e engrenagens, chamado coeficiente de rendimento mecânico da transmissão (η_m), ou seja:

$$N_r = N_0 \times \eta_m \quad (3.7)$$

Substituindo-se potência por N_r e força por Er na Equação 3.6 e isolando-se Er , tem-se:

$$Er = \frac{N_0 \times \eta_m}{v} \quad (3.8)$$

Para N_0 em HP, v em km/h e Er em kg, tem-se:

$$Er = \frac{274 \times N_0 \times \eta_m}{v} \quad (3.9)$$

Fazendo $Er = \Sigma R$ na Equação 3.9 e isolando-se v , tem-se a equação para determinar a velocidade de deslocamento da máquina:

$$v = \frac{274 \times N_0 \times \eta_m}{\Sigma R} \quad (3.10)$$

Substituindo-se ΣR na equação 3.10, tem-se, finalmente:

$$v = \frac{274 \times N_0 \times \eta_m}{P \times (K + 10 \times i)} \quad (3.11)$$

em que:

v : velocidade de deslocamento do equipamento (km/h);

N_0 : potência de desempenho do equipamento (HP);

η_m : coeficiente de rendimento mecânico da transmissão (adimensional);

P : peso do equipamento, carregado ou vazio (t);

K : coeficiente de rolamento da superfície de deslocamento (kg/t);

i : inclinação da superfície de deslocamento (%).

A equação 3.11 constitui a solução analítica para determinação das velocidades dos equipamentos. No entanto, derivadas dos conceitos acima, existem soluções gráficas para a estimativa das velocidades, baseadas em ábacos chamados de diagramas tração *versus* velocidade, como o da Figura 3.6.

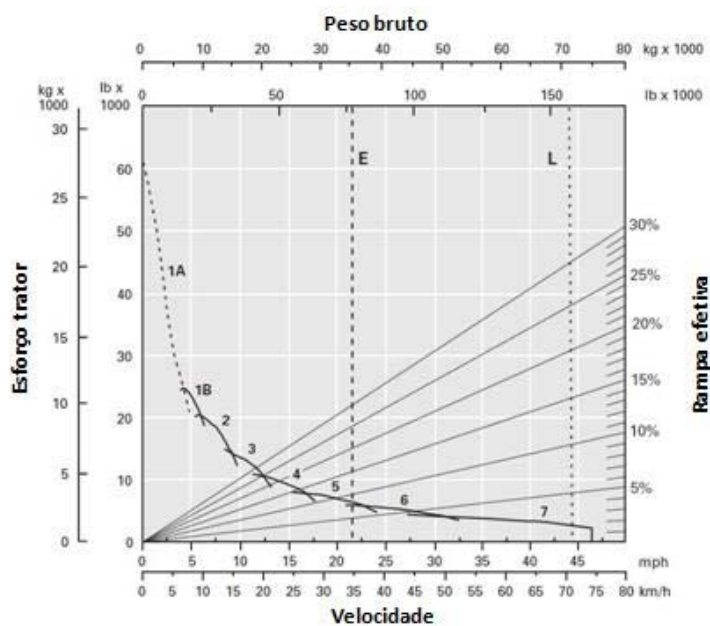


Figura 3.6: Exemplo de diagrama tração x velocidade.

Para utilizar os diagramas tração *versus* velocidade, é necessário utilizar o conceito de rampa efetiva, que é dada por:

$$i_{ef} = i_f + i = (K/10) + i \quad (3.12)$$

em que:

i_{ef} : rampa efetiva (%);

i_f : rampa fictícia, que é a resistência de rolamento convertida em uma rampa equivalente (%);

i : inclinação da superfície de deslocamento, com sinal algébrico (%);

K : coeficiente de rolamento da superfície deslocamento (kg/t).

A partir dos diagramas tração *versus* velocidade, determina-se a velocidade do equipamento, conforme a sequência:

- (1) traça-se na vertical uma linha referente ao peso do equipamento, carregado ou vazio, até interceptar-se a reta da rampa efetiva, determinando-se o primeiro

ponto de interseção;

- (2) a partir desse primeiro ponto de interseção, traça-se uma horizontal até interceptar-se uma determinada curva de marcha em um segundo ponto de interseção;
- (3) a partir do segundo ponto de interseção, traça-se uma vertical até o eixo horizontal do diagrama, determinando-se a velocidade correspondente.

Os diagramas tração *versus* velocidade são fornecidos pelos fabricantes de equipamentos para cada modelo de equipamento de transporte. Existem gráficos para rampas efetivas positivas e negativas.

Convém destacar que equações similares à equação 3.11, mas em essência derivadas do mesmo conceito, foram apresentadas nos trabalhos de Karshenas (1989) e de Gransberg (1996), que desenvolveram modelos para selecionar a melhor frota de carregadeiras e caminhões.

Outros trabalhos como o de Hicks (1993) e o de Marzouk e Moselhi (2004), têm procurado apresentar modelos para estimar as velocidades com maior precisão.

Hicks (1993) apresentou o seguinte modelo:

$$v = K_0 \times [0,01 \times cf \times (We + Uw + B) \times G]^n \quad (3.13)$$

em que:

v : velocidade (km/h);

K_0 : coeficiente determinado por análise de regressão;

cf : fator de conversão de unidades;

We : peso vazio da unidade transportadora (t ou 10^3 lb);

Uw : peso específico no corte do material (t/m^3 ou 10^3 lb/jd³);

B : capacidade da caçamba da unidade transportadora (m^3 ou jd^3);

G : rampa efetiva (%);

n : expoente determinado por regressão linear.

É importante ressaltar que o modelo de Hicks (1993) faz parte do FLSELECTOR, de El-Molsmani (2002) e El-Molsmani *et al.* (2002).

Segundo Marzouk e Moselhi (2004), o modelo de Hicks (1993) é útil quando comparado ao uso de ábacos, mas tem a limitação de não considerar as zonas de aceleração e desaceleração dos caminhos de serviço, que são considerados no modelo daqueles, desenvolvido em lógica *fuzzy*.

3.3.2. Tempo de ciclo de transporte

Uma vez determinada a velocidade, pode-se relacionar velocidade e distância de transporte para estimar o tempo de viagem em que um equipamento transporta material de um ponto A para um ponto B , conforme a seguinte sequência:

- 1) decompor o caminho de serviço em segmentos, dos quais sejam conhecidas as extensões e inclinação das rampas;
- 2) determinar a velocidade de viagem para cada segmento por meio de uma das soluções apresentadas;
- 3) determinar o tempo gasto no percurso de cada segmento, por meio do seu comprimento e da velocidade do equipamento.

Fazem-se esses cálculos para a viagem de ida, considerando-se o equipamento carregado, e para a viagem de retorno, considerando-se o equipamento descarregado, e obtém-se o tempo de viagem total.

Para obter-se o tempo de ciclo de transporte, ao tempo de viagem total, somam-se o tempo de manobra e descarga, de posicionamento na carga e de carregamento da unidade transportadora.

Convém destacar que as velocidades determinadas pela equação 3.11 são velocidades máximas, sendo necessário multiplicá-las por fatores de redução de velocidades para considerar as zonas de aceleração e desaceleração, chegando-se a velocidades médias (RICARDO e CATALANI, 2007), conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Fatores de redução para determinação de velocidades médias, considerando as zonas de aceleração e de desaceleração.

r < 136 kg/HP comprimento do trecho (m)	Trecho horizontal – velocidade inicial = 0	Unidade em movimento quando entra no trecho		
		em nível	declive	Active
0-60	0-0,40	0,65	0,67	1,00 (velocidade inicial maior do que a velocidade máxima calculada para o trecho)
60-120	0,40-0,51	0,65-0,70	0,67-0,72	
120-180	0,51-0,56	0,70-0,75	0,72-0,77	
180-300	0,56-0,67	0,75-0,81	0,77-0,83	
300-450	0,67-0,75	0,81-0,88	0,83-0,90	
450-600	0,75-0,80	0,88-0,91	0,90-0,93	
600-750	0,80-0,84	0,91-0,93	0,93-0,95	
750-1.050	0,84-0,87	0,93-0,95	0,95-0,97	
> 1.050	0,87-0,94	0,95	0,97	
136 kg/HP < r < 172 kg/HP comprimento do trecho (m)	Trecho horizontal – velocidade inicial = 0	Unidade em movimento quando entra no trecho		
		em nível	declive	Active
0-60	0-0,39	0-0,62	0,64	1,00 (velocidade inicial maior do que a velocidade máxima calculada para o trecho)
60-120	0,39-0,48	0,62-0,67	0,64-0,68	
120-180	0,48-0,54	0,67-0,70	0,68-0,74	
180-300	0,54-0,61	0,70-0,75	0,74-0,83	
300-450	0,61-0,68	0,75-0,79	0,83-0,88	
450-600	0,68-0,74	0,79-0,84	0,88-0,91	
600-750	0,74-0,78	0,84-0,87	0,91-0,93	
750-1.050	0,78-0,84	0,87-0,90	0,93-0,95	
> 1.050	0,84-0,92	0,90-0,93	0,95-0,97	

Fonte: RICARDO E CATALANI (2007).

3.3.3. Conceito de produção de equipamentos

Ricardo e Catalani (2007) definem a produção de um equipamento como “o volume escavado, transportado e descarregado na unidade de tempo”.

A produção efetiva de um equipamento é dada por:

$$Q_{ef} = (60 \times C \times \varphi \times E) / t_{cmin} \quad (3.14)$$

em que:

Q_{ef} : produção efetiva, medida no corte (m³/h);

C : capacidade da caçamba do equipamento, em volume solto (m³);

φ : fator de empolamento ou de conversão de volumes;

E : coeficiente de rendimento da operação ou fator de eficiência;

t_{cmin} : tempo de ciclo mínimo (min.).

A capacidade da caçamba do equipamento (C) é característica do equipamento e é especificada pelo fabricante. Pode ser utilizada a capacidade rasa ou a coroada. O ideal é que sempre seja utilizada a capacidade coroada, pois corresponde à maior produção.

O fator de conversão de volumes (φ) converte o volume solto em volume no corte. É característica do tipo de solo movimentado e é dado pela relação entre o peso específico solto e o peso específico no corte.

O tempo de ciclo mínimo (t_{cmin}) é o menor tempo em que o equipamento pode realizar o ciclo de operação e corresponde à produção máxima. É composto por tempos fixos e tempos variáveis.

Os tempos fixos incluem os tempos de carga, de manobras e de descarga. Os tempos variáveis são os tempos de transporte, que são função das distâncias de transporte.

Na prática, os equipamentos não trabalham continuamente, e relaciona-se o tempo de ciclo mínimo ao tempo de ciclo efetivo por meio do fator de eficiência (E).

O fator de eficiência (E) reflete os tempos de parada do equipamento que, segundo Ricardo e Catalani (2007), podem decorrer de várias causas, como: defeitos

mecânicos; más condições meteorológicas; más condições do solo; falta de habilidade ou imperícia do operador; organização deficiente dos serviços; esperas devido a outros equipamentos; e tipo do equipamento.

Na situação ideal, E assume o valor de 100% e a produção efetiva torna-se igual à produção máxima.

Como o fator de eficiência é um parâmetro que pode ser afetado diretamente pelo supervisor da obra, o valor a ser adotado é uma decisão de quem estima a produção do equipamento, baseada nas experiências anteriores e nas condições específicas do serviço que se deseja executar. Geralmente, adota-se o valor de 0,83 para estimar a produção de máquinas de esteiras e 0,75 para máquinas de pneus (RICARDO e CATALANI, 2007; MATTOS, 2006).

3.4. CUSTOS DE PRODUÇÃO

O custo unitário de produção, no geral, é o parâmetro final para escolher a melhor equipe para realizar um serviço de terraplenagem.

Às vezes, várias equipes atendem às exigências de projeto e de cronograma, escolhendo-se, então, a equipe que conduzir ao menor preço unitário.

Pode-se estimar o custo unitário de produção (CUP) por:

$$CUP = (\Sigma CH)/Q_{eq} \quad (3.15)$$

em que:

CUP : custo unitário de produção;

ΣCH : somatório dos custos horários dos equipamentos que compõem a equipe;

Q_{eq} : produção da equipe.

A produção da equipe é dada pela produção do equipamento que governa a produção e pode ser estimada conforme já discutido.

Os custos horários dos equipamentos, por outro lado, são de difícil estimativa, em razão da diversidade de fatores que incidem sobre eles e da variedade de equipamentos disponíveis (RICARDO e CATALANI, 2007).

Em síntese, os custos podem ser classificados em três grupos, de acordo com Ricardo e Catalani (2007): (1) de propriedade; (2) de operação; e (3) de manutenção.

Dentro dos custos de propriedade, são computadas a depreciação e a vida útil provável dos equipamentos e os juros do investimento de aquisição do equipamento.

Para os custos de operação, são necessários os custos associados a combustíveis, lubrificantes, material rodante e mão-de-obra de operação dos equipamentos.

Os custos de manutenção, por fim, estão associados aos custos com reparos mecânicos.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, foram apresentados o estado da prática e o estado da arte da seleção de equipamentos de terraplenagem e pavimentação.

Os fatores que afetam a seleção de cada tipo de equipamento foram discutidos.

Como a produção é, na maioria das vezes, o parâmetro final de escolha dos equipamentos, o método determinístico de estimativa da produção dos equipamentos foi apresentado.

Considerações sobre a mecânica da locomoção dos equipamentos foram feitas para que a estimativa do tempo de viagem das unidades transportadoras fosse compreendida.

Por fim, apresentaram-se os custos associados aos equipamentos.

No Capítulo seguinte, apresenta-se o sistema desenvolvido para auxiliar ao tomador de decisão na escolha da melhor frota de equipamentos para as operações de carga, escavação e transporte. O SAD desenvolvido, denominado SiSEq, estima a

produção dos equipamentos, dimensiona o número de unidades necessários para se atender a um prazo informado e calcula os custos unitários de produção para diferentes cenários de combinações de equipamentos.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, apresenta-se o SAD desenvolvido desde a sua concepção até as dificuldades encontradas no curso de seu desenvolvimento.

O SAD foi desenvolvido a partir da dificuldade de acesso a outros SAD já existentes. Decidiu-se, então, conceber o próprio SAD.

Seu diferencial está na sua fácil utilização, no seu dinamismo e na metodologia de estimativa da produção dos equipamentos e de dimensionamento das equipes.

Ressalte-se que, durante a pesquisa bibliográfica desta Dissertação, não se encontrou nenhuma citação que apresentasse um SAD similar, que tenha sido desenvolvido no Brasil.

4.2. APRESENTAÇÃO DO SAD DESENVOLVIDO

O SAD desenvolvido recebeu o nome de Sistema para Seleção de Equipamentos de Terraplenagem e Pavimentação (SiSEq).

No entanto, apesar de o nome do SAD referir-se somente a terraplenagem e a pavimentação, ele pode ser utilizado em qualquer serviço de movimentação de material realizado por escavocarregadoras (carregadeiras e escavadeiras) operando em conjunto com caminhões, ou seja, pode ser aplicado a qualquer operação que contenha o ciclo de escavação, carga e transporte.

O objetivo do SAD é estimar a produção, dimensionar o número de equipamentos e os custos de produção de um serviço de movimentação de material, a partir do volume a ser movimentado, do prazo estabelecido e das características do serviço.

O usuário pode definir os equipamentos para os quais deseja que o SAD realize a análise ou optar para que o mesmo realize a análise para todos os equipamentos cadastrados em sua base.

O usuário pode ainda cadastrar na base outros tipos e modelos de equipamentos, desde que disponha das especificações dos equipamentos.

Como resultado, o usuário pode analisar vários cenários de composições de frotas de equipamentos, com produções, número de unidades, prazos de execução e custos de produção.

4.3. CONCEPÇÃO DO SAD

A motivação para desenvolver o SiSEq apresentado surgiu a partir da falta de acesso às ferramentas citadas pela literatura. Não se teve acesso a nenhuma das ferramentas utilizadas na seleção de equipamentos de construção, com exceção da planilha desenvolvida por Mayfield (2004) para a seleção de *scrapers*.

Foram contatados via *e-mail* seis pesquisadores que desenvolveram ferramentas aplicadas à seleção de equipamentos, mas somente um respondeu e não disponibilizou a ferramenta desenvolvida.

Fabricantes de equipamentos também foram procurados na busca pelo acesso às ferramentas desenvolvidas, mas não foi obtido êxito.

Decidiu-se, então, desenvolver uma ferramenta similar àquela apresentada por Mayfield (2004) e com base no método de estimativa de produção de equipamentos apresentado por Ricardo e Catalani (2007) e por outros autores. A proposta foi expandir o trabalho de Mayfield (2004) e adequá-lo para a realidade dos equipamentos mais utilizados no país.

O principal diferencial da ferramenta proposta está nos tipos de equipamentos considerados: enquanto Mayfield (2004) considera *scrapers*, o SiSEq considera escavadeiras, carregadeiras e caminhões, que são os tipos de equipamentos mais utilizados em serviços de terraplenagem e de construção de pavimentos no Brasil.

Outro diferencial está na geração de composições de custo unitário no formato adotado no país, do SICRO/DNIT.

O SAD ainda realiza duas análises complementares que se destacam em relação a outros sistemas: a primeira trata da verificação da segurança quanto à carga de tombamento das carregadeiras, e a segunda corresponde à verificação das condições de aderência entre os caminhões e a superfície de rolamento do caminho de serviço.

Na primeira análise, a partir das características do material movimentado e da carga de tombamento da carregadeira analisada, o sistema verifica se a carregadeira poderá tombar, apresentando esta informação ao usuário. Essa verificação é um fator a ser considerado na escolha das carregadeiras conforme visto na revisão bibliográfica.

Na segunda análise, o sistema verifica se o caminhão terá problemas de aderência para vencer as rampas do caminho de serviço e também informa ao usuário.

4.4. O MODELO DO SAD

A entrada de dados no SiSEq é dividida em cinco módulos:

No primeiro módulo, o usuário define o tipo de análise, dentre duas alternativas:

- a) “Definir Equipe”;
- b) “Analisar todas as opções”.

Na primeira alternativa, o usuário define os equipamentos para os quais deseja realizar a análise e, na segunda, o SAD realiza os cálculos para todas as combinações possíveis entre os equipamentos cadastrados em sua base.

Na base de dados do SiSEq, há cadastrados 5 (cinco) modelos de equipamentos disponíveis no mercado, sendo uma carregadeira de pneus, uma carregadeira de esteiras, uma escavadeira hidráulica e dois caminhões fora-de-estrada (ver Apêndice).

Dessa forma, na segunda alternativa de análise, são avaliadas 6 (seis) combinações de modelos de unidades de escavação/carga com modelos de caminhões: o

SAD avalia os resultados para a carregadeira de pneus trabalhando com o primeiro modelo de caminhão e depois com o segundo modelo, e assim, para os demais modelos, gerando no total, seis combinações de equipes.

No segundo módulo, o usuário informa os dados gerais do serviço, a saber:

- a) volume a ser movimentado (m³);
- b) fator de eficiência da operação;
- c) prazo do serviço (dia);
- d) duração do turno de trabalho (h/dia).

No terceiro módulo, informam-se o tipo de solo do material a ser movimentado e seus pesos específicos no corte e solto, podendo o usuário adotar valores em *default*.

No quarto módulo, informam-se as características do caminho de serviço pelo qual o material é transportado do corte até o aterro, a saber:

- a) extensões dos segmentos (m);
- b) tipos de material das superfícies de rolamento;
- c) inclinações das superfícies de rolamento (%).

É importante destacar que o sistema desenvolvido considera mais tipos de superfície de rolamento do que o manual de custos rodoviários do SICRO, podendo o usuário acrescentar outros tipos, desde que disponha do coeficiente de rolamento do material da superfície. Isso significa afirmar que a velocidade dos caminhões pode ser estimada com mais confiabilidade, diferentemente do SICRO, que tabelou as velocidades dos caminhões em função de valores obtidos em campo somente para três tipos de superfície de rolamento.

No quinto módulo, informam-se os tempos fixos, ou seja, as parcelas do tempo de ciclo total que são consideradas fixas na estimativa da produção dos equipamentos. São tempos fixos:

- a) tempo de ciclo de carga da unidade escavocarregadora;
- b) tempo de manobra e descarga dos caminhões;
- c) tempo de posicionamento dos caminhões na carga.

Ao escolher o tipo de análise “Definir Equipe”, o usuário deve informar o tempo de ciclo da unidade escavocarregadora escolhida ou, caso escolha o segundo tipo, deve informar os tempos fixos para os três tipos de equipamentos (carregadeiras de esteiras, carregadeiras de pneus e escavadeiras).

Após a entrada dos tempos fixos, o usuário gera os resultados, e o SiSEq inicia, então, a análise com a estimativa das velocidades dos caminhões pela Equação 3.11, necessárias para a determinação do tempo de ciclo total.

Com o tempo de ciclo total, determina-se o número de caminhões para atender a uma unidade escavocarregadora – $N_{c/e}$.

O valor deste parâmetro implica em dois cenários: como geralmente $N_{c/e}$ não assume um valor inteiro, pode ser arredondado para baixo ou para cima. O SiSEq analisa as duas possibilidades.

Quando arredondado para baixo, gera-se o cenário em que os caminhões governam a produção, ou seja, os caminhões trabalham continuamente, e, durante parte do tempo de ciclo, a unidade escavocarregadora permanece ociosa aguardando os caminhões retornarem ao ponto de carga.

Quando $N_{c/e}$ é arredondado para cima, a situação inverte-se, e as carregadeiras passam a governar a produção fazendo com que os caminhões aguardem em filas.

Após o cálculo do número de caminhões por unidade escavocarregadora, o SiSEq determina a partir do volume a ser movimentado e do prazo, ou seja, da produção requerida, o número de escavocarregadoras e de caminhões necessários para cumprir o prazo. Os cálculos são determinísticos, ou seja, assume-se que os tempos de ciclos dos equipamentos são invariáveis, o que não ocorre na prática devido às diversas incertezas

dos processos construtivos.

Para cada cenário, existem também duas possibilidades de frota de equipamentos, com base nos arredondamentos dos números de equipamentos para atender ao prazo. O SiSEq apresenta, portanto, para cada combinação de escavocarregadora com caminhão quatro possibilidades de frotas de equipamentos.

Quando a equipe sugerida não consegue realizar o serviço dentro do prazo, o SiSEq sugere uma nova duração do turno de trabalho.

Por fim, o SiSEq determina os índices de produtividade e improdutividade dos equipamentos, a partir da comparação entre as produções dos equipamentos. Esses índices refletem os tempos em que os equipamentos ficam ociosos à espera do equipamento que governa a produção.

Com os índices de produtividade e improdutividade, com os custos horários dos equipamentos e com a produção das equipes, são calculados os custos unitários de produção e geradas as composições de custos.

4.5. LIMITAÇÕES DO SISTEMA

Foram identificadas três limitações básicas do sistema desenvolvido, detalhadas a seguir.

A primeira corresponde ao escopo considerado, pois abrange somente caminhões como unidades transportadoras e parte das unidades escavocarregadoras (carregadeiras de pneus, carregadeira de esteiras e escavadeiras hidráulicas com caçamba retroescavadora).

As unidades escavo-empurradoras, aplainadoras, compactadoras e escavadeiras *drag-line* e *clam-shell* não foram consideradas neste momento porque a metodologia de estimativa da produção desses equipamentos compreende processos totalmente distintos.

Na base de dados do sistema, foram cadastrados dois modelos de carregadeiras

de pneus, um modelo de escavadeira hidráulica e dois modelos de caminhões fora-de-estrada. As características de cada modelo são apresentadas em apêndice. Convém ressaltar que qualquer modelo de carregadeira, de pneus ou de esteiras, bem como de escavadeira pode ser cadastrado no SiSEq.

A segunda limitação do SAD é o determinismo na estimativa das produções e no dimensionamento dos equipamentos, o que significa afirmar que as incertezas dos processos construtivos, que são variadas e recorrentes, não são consideradas no SiSEq.

Na abordagem determinística, os tempos de ciclo dos equipamentos são considerados fixos, invariáveis. Quando se afirma, por exemplo, que um caminhão realiza a viagem de transporte em x minutos, não se considera que o equipamento pode encontrar várias interferências durante o seu percurso que o façam atrasar e conseqüentemente gerar filas quando retornar à posição de carregamento.

A abordagem determinística modela uma situação improvável de ocorrer na prática. Melhor seria estimar a produção dos equipamentos e dimensionar o número de unidades por métodos probabilísticos, como a Teoria das Filas e a simulação, que representam a realidade com maior confiabilidade (EL-MOSLMANI *et al.*, 2002).

No entanto, como o sistema permite a fácil alteração dos parâmetros considerados e a avaliação de vários cenários, acredita-se que o efeito dessa simplificação possa ser reduzido.

A terceira limitação está no modelo adotado para a estimativa da velocidade de viagem dos caminhões (equação 3.11), porque em certas situações, a resistência total pode ser negativa, gerando um valor de velocidade negativo. Isso significa que o equipamento consegue vencer as resistências opostas ao movimento e ainda há excesso de potência disponível.

Convém destacar que Karshenas (1989) e Gransberg (1996) utilizaram o mesmo conceito para estimar velocidades, apontando a limitação desse método para aplicação somente a resistências totais positivas. No entanto aqueles autores, não apresentaram o procedimento para estimar a velocidade no caso oposto.

Como não foi encontrado nada literatura, trabalho que tratasse dessa limitação, decidiu-se estabelecer uma rotina no sistema para que este adote a máxima velocidade do equipamento de transporte especificada pelo fabricante, cadastrada em sua base. A velocidade máxima especificada também é adotada quando a equação de estimativa da velocidade gera velocidades maiores que a velocidade máxima especificada.

4.6. RECURSOS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do SiSEq foram necessárias informações de fabricantes de equipamentos e ferramentas computacionais específicas, a saber:

4.6.1. Dados necessários

Com o objetivo de obter informações que pudessem complementar a etapa de revisão bibliográfica e contribuir para a concepção do sistema, decidiu-se elaborar um questionário a ser enviado a empresas construtoras especializadas em terraplenagem e em pavimentação.

Esse questionário, apresentado em apêndice, foi desenvolvido com base em outro similar desenvolvido por Xie (1997) para a concepção de seu sistema especialista aplicado à seleção de equipamentos de terraplenagem.

No entanto, a pesquisa não teve êxito, pois o questionário foi enviado para aproximadamente uma dezena de empresas, das quais somente uma empresa respondeu.

Para a concepção da base de dados do sistema, foram obtidas as especificações técnicas dos equipamentos em manuais de fabricantes, sítios da *internet* e no manual de custos do SICRO/DNIT.

4.6.2. Ferramentas computacionais utilizadas

O SiSEq foi desenvolvido para utilização por meio de um navegador na *internet*. Poderá ser acessado por meio de computadores e *smartphones*, tendo como requisito mínimo apenas a conexão com a *internet*. O sistema pode ser acessado pelo seguinte endereço: www.siseq.com.br.

Foram utilizados no desenvolvimento do sistema o *Microsoft Visual Studio 2010 Ultimate* e o *Microsoft SQL Server 2008*.

O *Microsoft Visual Studio 2010 Ultimate* consiste em um IDE (*Integrated Development Environment*) que oferece um conjunto de ferramentas para desenvolver códigos, corrigir erros e testar desempenho de aplicações.

O *Visual Studio* foi escolhido por contar com excelente suporte a desenvolvimento de aplicativos *Web* e por oferecer *IntelliTrace*, que facilita a depuração de um erro durante o momento de execução, levando o desenvolvedor no ponto exato da falha do código, permitindo a sua correção de maneira mais eficiente.

O *Visual Studio 2010* possui também uma *interface* desenvolvida usando WPF (*Windows Presentation Foundation*), que o torna mais intuitivo e apresenta um sistema de busca mais eficaz.

No entanto, por ser uma ferramenta mais completa, o *Visual Studio* não é livre, sendo necessário comprar a licença do *software*.

O *Microsoft SQL Server 2008* consiste em um SGBD (Sistema Gerenciador de Banco de Dados relacional), criado pela *Microsoft* em parceria com a *Sybase*, e trata-se de uma plataforma de dados confiável e produtiva, capaz de sustentar a execução de aplicações de grande portes.

Duas das principais características do *SQL Server 2008* são a elevada disponibilidade e a escalabilidade do banco. No *SQL Server 2008*, a segurança dos dados foi melhorada, aumentando-se a produtividade do desenvolvedor.

Como plataforma de desenvolvimento de aplicações *Web*, foi utilizado o *Asp.Net*, que é o sucessor do *ASP*. O *ASP.NET (Active Server Pages)* é um ambiente de desenvolvimento para aplicativos para *Web* e é uma tecnologia da *Microsoft*.

4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, foi apresentado o SAD desenvolvido, incluindo sua concepção, dificuldades encontradas, limitações e ferramentas utilizadas.

No próximo Capítulo, apresenta-se o procedimento de utilização do SAD por meio de um exemplo de aplicação.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO À DECISÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste Capítulo, é apresentado um exemplo de análise para mostrar a eficácia do SiSEq, como forma de validação do SAD desenvolvido.

Para um dado serviço de terraplenagem, apresentam-se o passo a passo da alimentação do SiSEq, e, em paralelo, a memória de cálculo da estimativa da produção dos equipamentos, do dimensionamento das unidades e do cálculo dos custos unitários de produção.

Na entrada de dados no sistema, considerou-se a análise do tipo 1, em que o usuário define os equipamentos para os quais deseja analisar os resultados.

5.2. EXEMPLO DE ANÁLISE

Em um serviço de terraplenagem, deverão ser movimentados 600.000m³ de solo (terra comum seca) em um prazo de 180 dias trabalháveis, com turnos de trabalho de 8 horas/dia.

A escavação e a carga do material deverão ser executadas por carregadeiras de pneus do modelo CAT 924G da fabricante Caterpillar, e o seu transporte, da zona de corte até a zona de aterro, deverá ser realizado por caminhões fora-de-estrada modelo CAT 770, também da fabricante Caterpillar.

As características do solo a ser movimentado, do caminho de serviço a ser utilizado no transporte e dos equipamentos definidos pelo usuário são apresentadas na Tabela 5.1, Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4.

Tabela 5.1: Características do solo a ser movimentado.

Peso específico solto - γ_s (kg/m ³)	Peso específico no corte - γ_c (kg/m ³)	Fator de conversão de volumes - ϕ
1.250	1.550	0,81

Tabela 5.2: Características do caminho de serviço.

Viagem	Segmento	Material da superfície de rolamento	Extensão (m)	Rampa (%)
Ida	1	terra seca, solta	800	-4
	2	terra seca, solta	700	+2
Retorno	1	terra seca, solta	700	-2
	2	terra seca, solta	800	+4

Tabela 5.3: Especificações da carregadeira CAT 924G Caterpillar.

Tipo	Carregadeira de pneus
Modelo	CAT 924G
Fabricante	Caterpillar
capacidade coroada da caçamba - c (m ³)	1,70
carga de tombamento - $CTomb$ (kg)	7.742
custo horário produtivo - CHP (R\$/h)	115,61
custo horário improdutivo - CHI (R\$/h)	61,70

Tabela 5.4: Especificações do caminhão CAT 770 Caterpillar.

Tipo	Caminhão fora-de-estrada
Modelo	CAT 770
Fabricante	Caterpillar
capacidade coroada da caçamba - C (m ³)	25,10
potência no volante - N_o (HP)	476
velocidade máxima de operação (km/h)	74,80
coeficiente de rendimento da transmissão - η	0,80
peso vazio - P_v (kg)	34.914
peso no eixo motriz, caminhão vazio - P_{mv}	$0,52 \times P_v$
peso no eixo motriz, caminhão carregado - P_{mi}	$0,66 \times P_t$
custo horário produtivo - CHP (R\$/h)	254,28
custo horário improdutivo - CHI (R\$/h)	136,67

5.3. ENTRADA DE DADOS

Na aba “Tipo de Análise”, informa-se o tipo de análise a ser realizada. No exemplo em questão, seleciona-se a opção “Definir Equipe”, pois o usuário já tem definidos os equipamentos a serem utilizados no serviço.

Em seguida, o sistema apresenta a lista dos equipamentos cadastrados em seu banco de dados para que o usuário escolha. Seleciona-se, então, a carregadeira de rodas CAT 924G - Caterpillar como unidade escavocarregadora e o caminhão fora-de-estrada CAT 770 - Caterpillar como unidade transportadora (Figura 5.1).

SisEq

Sistema para Seleção de Equipamentos de Terraplenagem e Pavimentação

Você está em [Início](#) > [Relatório](#) > Gerar Produtividade

Tipo de Análise | Dados do Serviço | Material Movimentado | Caminho de Serviço | Tempos Fixos

TIPO DE ANÁLISE

Informe a opção desejada:

Definir Equipe

Unidade Escavocarregadora: Caterpillar CAT 924G - Carregadeira de pneus

Unidade Transportadora: Caterpillar - CAT 770

OK

Figura 5.1: Entrada de dados no SiSEq – Tipo de Análise.

Na aba “Dados do Serviço” (Figura 5.2), informam-se as características gerais do serviço, resumidas na Tabela 5.5:

Tabela 5.5: Exemplo de análise - características gerais do serviço.

volume a ser movimentado - V (m ³)	600.000
prazo (dias)	180
turno de trabalho (h/dia)	8
fator de eficiência	0,83

SisEq
Sistema para Seleção de Equipamentos de
Terraplenagem e Pavimentação

Você está em Início > Relatório > Gerar Produtividade

Tipo de Análise Dados do Serviço Material Movimentado Caminho de Serviço Tempos Fixos

DADOS DO SERVIÇO

Volume a ser movimentado (m³): 600000

*Fator de Eficiência: 0,83

Duração (dias): 180

Duração de Trabalho (horas/dia): 8

OK

Figura 5.2: Entrada de dados no SiSEq – Dados do Serviço.

Na aba “Material Movimentado”, seleciona-se o tipo de material a ser movimentado, e caso o usuário decida utilizar os valores padrões para os pesos específicos, habilita-se o *checkbox* “default”.

Neste exemplo, usam-se os valores em *default*, que no caso são 1.250kg/m³ para o peso específico solto e 1.550kg/m³ para o peso específico no corte (Figura 5.3).

SisEq
Sistema para Seleção de Equipamentos de
Terraplenagem e Pavimentação

Você está em Início > Relatório > Gerar Produtividade

Tipo de Análise Dados do Serviço Material Movimentado Caminho de Serviço Tempos Fixos

Material Movimentado

Material movimentado:
Terra comum seca

Peso Especifico no Corte:(kg/m³) 1550 Default

Peso Especifico Solto: (kg/m³) 1250 Default

OK

Figura 5.3: Entrada de dados no SiSEq – Material Movimentado.

Na aba “Caminho de Serviço” (Figura 5.4), informam-se as características do caminho de serviço a serem utilizadas pelos caminhões para transportar o material da zona de corte até a zona de aterro, apresentadas na Tabela 5.2.

SisEq
Sistema para Seleção de Equipamentos de Terraplenagem e Pavimentação

Você está em Início > Relatório > Gerar Produtividade

Tipo de Análise | Dados do Serviço | Material Movimentado | **Caminho de Serviço** | Tempos Fixos

DADOS DO CAMINHO DE SERVIÇO

Segmento	Superfície de rolamento	Extensão (m)	Rampa (%)
3	----		

Viagem de Ida

Segmento	Material	Extensão(m)	Rampa(%)
1	Terra seca, solta	800.00	-4
2	Terra seca, solta	700.00	2

Viagem de Retorno

Segmento	Material	Extensão(m)	Rampa(%)
1	Terra seca, solta	700.00	-2
2	Terra seca, solta	800.00	4

>> Avançar

Figura 5.4: Entrada de dados no SiSEq – Caminho de Serviço.

Após informar os dados para o primeiro segmento do caminho de serviço da viagem de ida, clica-se no botão “Adicionar segmento” para adicionar outro segmento, e assim é feito até a inclusão do último segmento da viagem de ida, quando, então, clica-se no botão “Concluir percurso” para finalizar.

O sistema, então, reconhecerá o percurso de volta como o mesmo percurso de ida em termos de extensões e apenas inverterá a numeração de identificação do segmento e o sinal algébrico das inclinações das rampas.

Na última aba, chamada de “Tempos Fixos” (Figura 5.5), são informados os tempos de ciclo considerados fixos na operação dos equipamentos, em minutos.

Neste exemplo, consideraram-se como tempos fixos os seguintes valores:

Tabela 5.6: Exemplo de análise - valores de tempos fixos

ciclo da carregadeira de pneus - t_{ce} (min)	0,45
manobra e descarga dos caminhões - t_d (min)	1,00
posicionamento na carga dos caminhões - t_p (min)	0,15

Após a entrada dos tempos fixos, clica-se no botão “Gerar Resultados”.

Figura 5.5: Entrada de dados no SiSEq – Tempos Fixos.

5.4. RESULTADOS

Os resultados são exibidos em três módulos, a saber: “Tempo de viagem dos caminhões”, “Dimensionamento de equipes” e “Custos unitários de produção”.

5.4.1. Tempo de viagem dos caminhões

Neste módulo, a partir das características do caminho de serviço e das especificações dos caminhões constantes na base de dados do sistema, determina-se o tempo de viagem dos caminhões.

Inicialmente, calcula-se para cada segmento do caminho de serviço a velocidade de viagem máxima dos caminhões, utilizando-se a equação 3.11, tanto para o percurso

de ida quanto para o de volta.

Na viagem de ida, P corresponde ao peso total do caminhão (P_t), ou seja, o peso vazio do caminhão (P_v) somado ao peso da carga (P_c). Este é dado pelo produto entre o peso específico solto do material e a capacidade volumétrica da caçamba do caminhão, que são respectivamente 1.250kg/m^3 e $25,10\text{m}^3$ para este exemplo. O peso total do caminhão (P_t) é, então:

$$P_t = P_v + P_c = P_v + \gamma_s \times C \quad (5.1)$$

Neste exemplo, o valor de P_t encontrado foi 66.289kg .

Na viagem de retorno, P é igual ao peso vazio do caminhão (P_v), que, como consta na Tabela 5.4, é de 34.914kg , ou seja:

$$P = P_v \quad (5.2)$$

Quanto ao coeficiente de rolamento, o sistema busca na Tabela 5.7, constante em sua base de dados, seu valor para cada segmento em função do tipo de material da superfície de rolamento informado na aba “Caminho de Serviço”.

Tabela 5.7: Valores de coeficientes de rolamento e de aderência

material da superfície de rolamento	coeficiente de rolamento (kg/t)	coeficiente de aderência (kg/t)
Revestimento em asfalto ou concreto	20	900
Terra seca, firme	30	550
Terra seca, solta	50	450
Terra úmida	160	200

Os valores das inclinações das rampas, com seus respectivos sinais algébricos,

são informados pelo usuário e, para este caso, estão apresentados na Tabela 5.2.

As velocidades máximas são, então, obtidas por meio da equação 3.11, e as velocidades médias são dadas pelo produto das velocidades máximas pelos fatores de redução, que são extraídos da Tabela 3.4.

Na determinação das velocidades para este exemplo, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Resultados da estimativa da velocidade de viagem dos caminhões.

Ida Segmento 1	velocidade máxima - 157,40km/h
	velocidade adotada (velocidade máxima de operação) - 74,80km/h
	relação peso/potência - 139kg/HP
	comprimento do segmento - 800m
	velocidade inicial - 0km/h
	fator de redução - 0,81
	velocidade média - 60,59km/h
Ida Segmento 2	velocidade máxima - 22,49km/h
	velocidade adotada - 22,49km/h
	relação peso/potência - 139kg/HP
	comprimento do segmento - 700m
	unidade em movimento/trecho em aclave
	fator de redução - 1,00
	velocidade média - 22,49km/h
Retorno Segmento 1	velocidade máxima - 99,62km/h
	velocidade adotada (velocidade máxima de operação) - 74,80km/h
	relação peso/potência - 73kg/HP
	comprimento do segmento - 800m
	velocidade inicial - 0
	fator de redução - 0,85
	velocidade média - 63,58km/h
Retorno Segmento 2	velocidade máxima - 33,21km/h
	velocidade adotada - 33,21km/h
	relação peso/potência - 73kg/HP
	comprimento do segmento - 700m
	unidade em movimento/trecho em aclave
	fator de redução - 1,00
	velocidade média - 33,21km/h

Convém destacar que, conforme apresentado anteriormente, quando a velocidade máxima estimada pela equação 3.11, excede a velocidade máxima de operação do caminhão, o sistema adota esta última nos cálculos.

Com os valores das velocidades médias, em km/h, e das extensões dos segmentos do caminho de serviço, em metros, são calculados os tempos de viagem para cada segmento, por meio da expressão 5.3:

$$tv_n = (0,06 \times Ln)/vm_n \quad (5.3)$$

em que:

tv_n : tempo de viagem para o n-ésimo segmento (min);

Ln : extensão do n-ésimo segmento (m);

vm_n : velocidade média para o n-ésimo segmento (km/h)

O tempo de viagem total (tv) é dado pela soma dos tempos de viagem para cada segmento.

Os resultados do cálculo do tempo de viagem dos caminhões para este exemplo são, então, exibidos na tela gerada pelo sistema, mostrada na Figura 5.6.

Tempo de viagem dos caminhões

Caminhão fora-de-estrada CAT 770 Caterpillar								
Viagem	Segmento	Material da superfície de rolamento	Extensão (m)	Rampa (%)	Velocidade máxima	Fator de redução	Velocidade média (km/h)	tempo de viagem (min)
Ida	1	terra seca, solta	800	-4	74,80	0,81	60,59	0,79
	2	terra seca, solta	700	2	22,49	1,00	22,49	1,87
Retorno	1	terra seca, solta	700	-2	74,80	0,85	63,58	0,66
	2	terra seca, solta	800	4	33,21	1,00	33,21	1,45
tempo de viagem total (ida+retorno)								4,77

Figura 5.6: Resultado gerado pelo SiSEq – Tempo de viagem dos caminhões.

5.4.2. Dimensionamento das equipes

Dimensionar as equipes significa definir a composição das equipes, ou seja, quantas carregadeiras e caminhões serão necessários para movimentar o volume informado dentro do prazo estabelecido.

O dimensionamento começa pelo cálculo do número de caminhões para atender a uma carregadeira, que é calculado conforme as seguintes etapas:

(1) Número de ciclos de carga (caçambadas) para carregar um caminhão ($N_{caç}$)

A partir das capacidades das caçambas da carregadeira (c) e do caminhão (C), constantes na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4, respectivamente, calcula-se o número de ciclos de carga (caçambadas) que a carregadeira terá que realizar para completar a carga de um caminhão, por meio da expressão 5.4:

$$N_{caç} = C/c \quad (5.4)$$

Para o exemplo em questão, foi encontrado o número de 14,76 caçambadas e adotou-se o número de 14 caçambadas.

(2) Tempo de carga de um caminhão (t_{carga})

Com o número de ciclos de carga ($N_{caç}$) e com o tempo de ciclo da carregadeira (t_{ce}) (Tabela 5.6), tem-se:

$$t_{carga} = N_{caç} \times t_{ce} \quad (5.5)$$

Para 14 ciclos de carga e o tempo de ciclo da carregadeira de 0,45min, e o tempo de carga de um caminhão é 6,30min.

(3) Tempo de ciclo de transporte mínimo (t_{ct})

O tempo de ciclo de transporte mínimo é dado pela soma do tempo de carga

(t_{carga}), do tempo de viagem total (t_v), do tempo de manobra e descarga (t_d) e do tempo de posicionamento na carga (t_p).

O tempo de carga é calculado no passo (2), o tempo de viagem total é apresentado na Figura 5.6, e os dois últimos tempos são informados na aba “Tempos Fixos” e, para este exemplo, são apresentados na Tabela 5.6, ou seja:

$$t_{ct} = t_{carga} + t_v + t_d + t_p \quad (5.6)$$

O tempo de ciclo de transporte mínimo encontrado para o exemplo em questão foi 12,22min.

(4) Número de caminhões por carregadeira ($N_{c/e}$)

O número de caminhões que uma carregadeira consegue atender $N_{c/e}$ é dado pela equação 5.7 cujas variáveis já foram apresentadas:

$$N_{c/e} = t_{ct}/t_{carga} \quad (5.7)$$

$N_{c/e}$ deve ser arredondado para o número inteiro imediatamente inferior ou superior. Partindo desse princípio, o sistema trabalha com dois cenários: no primeiro cenário, $N_{c/e}$ é arredondado para baixo, o que significa afirmar que os caminhões governam a produção da equipe; e no segundo cenário, $N_{c/e}$ é arredondado para cima, e a carregadeira governa a produção (GRANSBERG, 1996; RICARDO E CATALANI, 2007).

No exemplo em questão, o $N_{c/e}$ encontrado foi de 1,94.

A seguir, apresenta-se o memorial de cálculo para os dois cenários possíveis, arredondando-se o valor encontrado para 1 e em seguida para 2:

5.4.2.1. Cenário 1

Após definido que uma carregadeira opera com um caminhão, é preciso definir o

número de carregadeiras e de caminhões necessários para movimentar o volume dentro do prazo estabelecido.

Para tanto, são necessárias a produção requerida (Q_r) e a produção de um caminhão (Q_c).

Para determinar Q_c , é necessário conhecer o volume de material (V_t) que um caminhão transporta efetivamente, conforme a equação 5.8 cujas variáveis já foram definidas:

$$V_t = N_{caç} \times c \quad (5.8)$$

Para 14 ciclos de carga de uma caçamba de capacidade de 1,70m³, o volume total transportado pelo caminhão é, então, de 23,80m³.

Pode-se, então, determinar a produção horária de um caminhão a partir da equação 5.9 cujas variáveis já foram definidas:

$$Q_c = (V_t \times \varphi \times E \times 60) / tct \quad (5.9)$$

Convém esclarecer que a equação 5.9 é a mesma equação 3.14, de forma que, neste exemplo, a capacidade do caminhão é substituída pelo volume efetivamente transportado pelo caminhão, o fator de conversão de volumes é apresentado na Tabela 5.1, o fator de eficiência da operação é apresentado na Tabela 5.5, e o tempo de ciclo mínimo equivale ao tempo de ciclo de transporte mínimo.

Para este exemplo, foi encontrada a produção de um caminhão de 78,56m³/h.

A produção requerida (Q_r) é, então, calculada a partir do volume (V) de material a ser movimentado e do prazo (PZ) estabelecido, conforme segue:

$$Q_r = V/PZ \quad (5.10)$$

Para este exemplo, em que há o volume de 600.000m³ para movimentar em 180 dias trabalháveis com 8h/dia, resultando em 1.440h de trabalho, é necessária a produção de 416,67m³/h para se atender ao prazo.

Finalmente, o número de caminhões necessários para atender à produção requerida (N_c), é dado por:

$$N_c = Q_r / Q_c \quad (5.11)$$

N_c também pode ser arredondado para baixo ou para cima, então:

➤ Para $N_c = 5$ caminhões:

O número de carregadeiras necessário para atender aos 5 caminhões, com cada carregadeira trabalhando com 1 caminhão é N_e e é dado por:

$$N_e = N_c / N_{c/e} \quad (5.12)$$

Tem-se, então, a composição da equipe 1, formada por $N_e = 5$ carregadeiras CAT 924G Caterpillar e $N_c = 5$ caminhões fora-de-estrada CAT 770 Caterpillar, sendo que cada carregadeira opera com um caminhão.

Como os caminhões governam a produção, a produção da equipe 1 (Q_{eq}) é dada pela produção da frota de caminhões, ou seja:

$$Q_{eq} = N_c \times Q_c \quad (5.13)$$

Tem-se que os 5 caminhões, cada um com produção de 78,56m³/h, produzem em conjunto $Q_{eq} = 392,80\text{m}^3/\text{h}$.

O prazo em que a equipe 1 consegue movimentar o volume desejado é PZ e é dado por:

$$PZ = V/Q_{eq} \quad (5.14)$$

Tem-se que os 5 caminhões governando a produção com a capacidade de 392,80m³/h conseguem movimentar 600.000m³ em 1.527,49h. No entanto, como o prazo disponível para a execução do serviço é $PZ = 1.440h$, conclui-se que a equipe 1 não consegue executar o serviço dentro do prazo estabelecido, a não ser que o turno de trabalho seja aumentado.

Nesse caso, o SiSEq sugere uma nova duração para o turno de trabalho, que é calculada a partir do excedente de horas por dia (ΔT) que deve ser adicionado ao turno de trabalho, conforme segue:

$$T' = T + \Delta T \quad (5.15)$$

em que:

T' : nova duração do turno de trabalho (horas/dia)

T : turno de trabalho informado pelo usuário (horas/dia)

ΔT : horas de trabalho adicionais necessárias (horas/dia)

ΔT é calculado subtraindo-se, da quantidade de horas necessárias pela equipe para se realizar o trabalho, o prazo disponível para a realização do mesmo, e dividindo-se o excedente pelo número de dias disponíveis.

O resultado encontrado mostra que, se a equipe 1 desejar cumprir o prazo estabelecido, terá que trabalhar turnos diários de 8h29 min.

➤ Para $N_c = 6$ caminhões

O número de carregadeiras necessário para atender aos 6 caminhões, com cada carregadeira trabalhando com 1 caminhão é 6, conforme a equação 5.12.

Tem-se, então, a composição da equipe 2, formada por $N_e = 6$ carregadeiras CAT 924G Caterpillar e $N_c = 6$ caminhões fora-de-estrada CAT 770 Caterpillar, sendo que cada carregadeira opera com um caminhão.

Como os caminhões governam a produção, a produção da equipe 2 é dada pela produção da frota de caminhões, conforme a equação 5.13.

Tem-se que os 6 caminhões, cada um com produção de $78,56\text{m}^3/\text{h}$, produzem em conjunto $Q_{eq} = 471,36\text{m}^3/\text{h}$.

O prazo em que a equipe 2 consegue movimentar o volume desejado, conforme a equação 5.14, é de $1.272,91\text{h}$, portanto, dentro do prazo informado pelo usuário.

5.4.2.2. Cenário 2

Como neste cenário, são as carregadeiras que governam a produção, é necessário primeiramente determinar o número de carregadeiras (N_e) para atender à produção requerida e depois definir o número de caminhões correspondentes.

Para determinar N_e , são necessárias a produção requerida (Q_r), já determinada, e a produção de uma carregadeira (Q_e), calculada pela equação 3.14.

Para este exemplo, em que a carregadeira tem capacidade de $1,70\text{m}^3$, para um fator de conversão de volumes de 0,81, para um fator de eficiência de 0,83 e para um tempo de ciclo da carregadeira de 0,45min, a produção de uma carregadeira (Q_e) é de $152,39\text{m}^3/\text{h}$, e a produção requerida (Q_r) é de $416,67\text{m}^3/\text{h}$.

N_e é, portanto, igual a 2,73 carregadeiras, conforme a equação 5.16:

$$N_e = Q_r/Q_e \quad (5.16)$$

N_e também pode ser arredondado para baixo ou para cima, então:

- Para $N_e = 2$ carregadeiras:

O número de caminhões necessários para atender às 2 carregadeiras, com cada

carregadeira trabalhando com 2 caminhões é 4 unidades, conforme a equação 5.17:

$$N_c = N_e \times N_{c/e} \quad (5.17)$$

Tem-se, então, a composição da equipe 3, formada por $N_e = 2$ carregadeiras CAT 924G Caterpillar e $N_c = 4$ caminhões fora-de-estrada CAT 770 Caterpillar, sendo que cada carregadeira opera com dois caminhões.

Como as carregadeiras governam a produção, a produção da equipe 3 (Q_{eq}) é dada pela produção da frota de carregadeiras, ou seja:

$$Q_{eq} = N_e \times Q_e \quad (5.18)$$

Para 2 carregadeiras, com cada uma produzindo $152,39\text{m}^3/\text{h}$, a produção da equipe (Q_{eq}) é $304,78\text{m}^3/\text{h}$.

O prazo em que a equipe 3 consegue movimentar o volume desejado é, conforme a equação 5.14, de $1.968,63\text{h}$, sendo, portanto, necessário para que essa equipe cumpra o prazo um novo turno diário de $10\text{h}56\text{min}$, conforme a equação 5.15.

➤ Para $N_e = 3$ carregadeiras:

São necessários, conforme a equação 5.17, 6 caminhões para atender às 3 carregadeiras, com cada carregadeira trabalhando com 2 caminhões.

Tem-se, então, a composição da equipe 4, formada por $N_e = 3$ carregadeiras CAT 924G Caterpillar e $N_c = 6$ caminhões fora-de-estrada CAT 770 *Caterpillar*, sendo que cada carregadeira opera com dois caminhões.

Como as carregadeiras governam a produção, a produção da equipe 4 (Q_{eq}) é dada pela produção da frota de carregadeiras, conforme a equação 5.18, sendo igual a $457,17\text{m}^3/\text{h}$, para 3 carregadeiras com produção de $152,39\text{m}^3/\text{h}$.

O prazo em que a equipe 4 consegue movimentar o volume desejado é,

conforme a equação 5.14, de 1.312,42h, portanto, menor do que o prazo disponível de 1.440h.

O SiSEq gera, portanto, quatro diferentes composições de equipes. O resultado final do módulo de dimensionamento das equipes é mostrado na Figura 5.7, que é a planilha que o sistema gera para que o tomador de decisão escolha a frota de equipamentos.

Composições de equipes - lista de alternativas

Equipe	Operação	Equipamento	Produção de um equipamento (m³/h)	Qtde	Produção da frota (m³/h)	Produção da equipe (m³/h)	Prazo de execução da equipe (horas)	Turno de trabalho sugerido (horas/dia)	Custo unitário de produção (R\$/m³)	Custo total do serviço (R\$)
1	caminhões governando produção	carregadeira de pneus CAT 924G <i>Caterpillar</i>	152,39	5	761,95	392,80	1.527,49	8,49	4,38	2.628.000,00
		caminhão fora-de-estrada CAT 770 <i>Caterpillar</i>	78,56	5	392,80					
2	caminhões governando produção	carregadeira de pneus CAT 924G <i>Caterpillar</i>	152,39	6	914,34	471,36	1.272,91	-	4,38	2.628.000,00
		caminhão fora-de-estrada CAT 770 <i>Caterpillar</i>	78,56	6	471,36					
3	carregadeiras governando produção	carregadeira de pneus CAT 924G <i>Caterpillar</i>	152,39	2	304,78	304,78	1.968,63	10,94	4,05	2.430.000,00
		caminhão fora-de-estrada CAT 770 <i>Caterpillar</i>	78,56	4	314,24					
4	carregadeiras governando produção	carregadeira de pneus CAT 924G <i>Caterpillar</i>	152,39	3	457,17	457,17	1.312,42	-	4,05	2.430.000,00
		caminhão fora-de-estrada CAT 770 <i>Caterpillar</i>	78,56	6	471,36					

Figura 5.7: Resultado gerado pelo SiSEq – Dimensionamento das equipes.

5.5. CUSTOS UNITÁRIOS DE PRODUÇÃO

Para a determinação dos custos unitários de produção, é preciso primeiramente calcular os índices de produtividade e improdutividade dos equipamentos.

No primeiro cenário, os caminhões governam a produção, e as carregadeiras permanecem ociosas durante um intervalo de tempo, aguardando os caminhões.

Como os caminhões trabalham durante todo o ciclo de operação, isso significa que seu índice de produtividade é 100% ($IP_c = 1,00$), e seu índice de improdutividade é nulo ($II_c = 0$).

O índice de produtividade dos equipamentos complementares, no caso as carregadeiras, pode ser obtido dividindo-se a produção da frota de caminhões que atendem a uma carregadeira pela produção da carregadeira, conforme a equação 5.19:

$$IP_e = (N_{c/e} \times Q_c) / Q_e \quad (5.19)$$

em que:

IP_e : índice de produtividade da unidade escavocarregadora (adimensional);

$N_{c/e}$: número de caminhões por unidade escavocarregadora;

Q_c : produção de um caminhão (m^3/h);

Q_e : produção de uma unidade escavocarregadora (m^3/h).

No exemplo em questão, para o caso do primeiro cenário, em que um caminhão opera com uma carregadeira, o índice de produtividade é igual a 0,52, e o índice de improdutividade é igual a 0,48.

Estes índices referem-se tanto à equipe 1 quanto à equipe 2, em que os caminhões governam a produção.

No segundo cenário, a situação inverte-se: as carregadeiras passam a governar a produção e passam a trabalhar durante todo o ciclo de operação.

Os índices de produtividade e improdutividade das carregadeiras são, portanto, respectivamente, $IP_e = 1,00$ e $II_e = 0$.

O índice de produtividade dos caminhões pode ser calculado dividindo-se a produção da equipe, que no caso é a produção da carregadeira, pela produção da frota de caminhões que atendem a uma carregadeira, conforme a equação 5.20:

$$IP_c = Q_e / (N_{c/e} \times Q_c) \quad (5.20)$$

em que:

IP_c : índice de produtividade do caminhão (adimensional);

$N_{c/e}$: número de caminhões por unidade escavocarregadora;

Q_c : produção de um caminhão (m^3/h);

Q_e : produção de uma unidade escavocarregadora (m^3/h).

Os índices de produtividade e improdutividade dos caminhões obtidos, portanto, foram 0,97 e 0,03, respectivamente.

Ressalte-se que, com base nos resultados dos índices de produtividade e de improdutividade, no cenário em que as carregadeiras governam a produção das equipes, a produção é maior para os dois tipos de equipamentos, pois os índices apresentam valores mais próximos da unidade.

Finalmente, de posse do número de unidades de cada equipamento, da produção das equipes, dos índices de produtividade e improdutividade e dos custos horários dos equipamentos, o SiSEq gera as composições de custos unitários para as quatro equipes apresentadas em apêndice.

5.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A planilha apresentada na Figura 5.7 é o produto final gerado pelo SiSEq, a partir do qual é possível extrair as seguintes conclusões:

- a) as equipes 1 e 2 realizam o serviço pelo mesmo custo (R\$ 2.628.000,00), no entanto, a equipe 1 não consegue realizar o serviço em 1.440h, diferentemente da equipe 2, que executa o serviço em um número de horas menor que o estabelecido;
- b) as equipes 3 e 4 realizam o serviço pelo custo de R\$ 2.430.000,00, o que corresponde a uma economia de R\$ 198.000,00 (cerca de 8%) em relação ao custo de execução das outras duas equipes;
- c) ressalte-se que, conforme a tabela apresentada na figura 5.7, as equipes 2 e 4 conseguem realizar o serviço em um tempo menor que aquele disponível de 1.440h. O SiSEq não apresenta, portanto, para essas duas

equipes, um turno de trabalho sugerido;

- d) ressalte-se que a avaliação feita neste exemplo refere-se a um serviço de movimentação de material. A economia para uma obra rodoviária, por exemplo, torna-se muito maior quando se considerarem todos os serviços de movimentação de materiais da obra;
- e) caso o objetivo seja minimizar o custo e atender ao prazo de 1.440h, com turnos de trabalho de 8horas/dia, a melhor configuração de frota é a equipe 4;
- f) com os novos turnos de trabalho sugeridos pelo SiSEq, o tomador de decisão pode estimar os custos com mão de obra e decidir se é viável adotar novos turnos de trabalho e cumprir o prazo estabelecido;
- g) com as diferentes configurações de frota, o tomador de decisão pode analisar a possibilidade de se adquirir ou alugar outros equipamentos, desde que os custos de aquisição acarretem na redução do prazo ou dos custos de produção.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir do desenvolvimento desta pesquisa, é possível concluir que:

- a) o SiSEq, apesar de suas limitações, apresenta caráter inovador no meio acadêmico nacional, pois não se encontraram ferramentas similares no país;
- b) o SiSEq pode ser útil tanto a empreiteiras quanto a empresas projetistas e a órgãos rodoviários;
- c) as construtoras podem utilizar a ferramenta no planejamento de suas obras, realizando diversas simulações para obter estimativas de custos mais precisas e para balizar a aquisição ou aluguel de equipamentos que a empresa não possua ou ainda na formação de preços em um processo licitatório;
- d) as empresas projetistas podem sugerir os equipamentos ideais a serem utilizados na obra;
- e) os órgãos rodoviários, no tocante a serviços de carga, escavação e transporte podem utilizar a ferramenta na composição de tabelas de custos unitários, podendo gerar vários cenários com a simples alteração dos parâmetros de entrada, para obter composições de custos mais condizentes com a realidade das obras no país;
- f) a principal vantagem do SiSEq está em seu dinamismo, pelo qual o usuário pode alterar facilmente os parâmetros de entrada e avaliar os reflexos dessas alterações sobre os custos.

Como recomendações para o aperfeiçoamento do trabalho e para a realização de pesquisas futuras, podem-se citar:

- a) a expansão do escopo do sistema, considerando os demais tipos de equipamentos, como tratores de lâmina, *motoscrapers*, compactadores e

motoniveladoras, assim como os equipamentos utilizados na execução das outras camadas do pavimento, como o revestimento;

- b) a adoção de modelos mais precisos para a estimativa da velocidade dos caminhões, como aqueles apresentados por Hicks (1993) e por Marzouk e Moselhi (2004);
- c) a utilização de métodos probabilísticos para a estimativa da produção dos equipamentos, como a Teoria das Filas, eliminando assim a principal limitação do SiSEq, que é o determinismo;
- d) a integração do sistema com simulação de eventos discretos para a estimativa da produção dos equipamentos, complementando a sugestão anterior;
- e) o desenvolvimento de mais funcionalidades para o SAD, como a geração de gráficos para permitir a melhor visualização dos cenários sugeridos pelo sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAM, I. (2001) *Planejamento de Obras Rodoviárias*. Ed. ANEOR, Salvador, BA.
- ABRAM, I. e ROCHA, A. V. (2009) *Manual Prático de Terraplenagem*. Ed. ANEOR, Salvador, BA.
- AGATTACH (2012) Disponíveis em <<http://www.agattach.co.nz/i-155ts2-front-ashland-pull-scraper.html>>. Acessado em: 16/07/2012
- ALKASS, S. e HARRIS, F. (1988) Expert System for Earthmoving Equipment Selection in Road Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, v.114, n. 3, p. 426-440.
- ALKASS, S.; ARONIAN, A. e MOSELHI, O. (1993) Computer-aided Equipment Selection for Transporting and Placing Concrete. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 119, n. 3, p. 445-465.
- ALKASS, S; ALHUSSEIN, M. e MOSELHI, O. (1997) Computerized Crane Selection for Construction Projects. *13th Annual ARCOM Conference*, v. 2, p. 427-436.
- AMIRKHANIAN, S. N. e BAKER, N. J. (1992) Expert System for Equipment Selection for Earth-Moving Operations, *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 118, n. 2, p. 318-331.
- AUTOLINE-EU (2012) Disponível em <<http://autoline-eu.co.uk/sf/special-machinery-front-shovel-excavator-KOMATSU-PC-1250-7-12070110503466718200.html>> Acessado em: 16/07/2012
- BAU FORUM (2012) Disponível em <<http://forum.bauforum24.biz/forum/index.php?showtopic=33678>> Acessado em: 16/07/2012
- CATERPILLAR (2012a) Disponível em <<http://brasil.cat.com/>>. Acessado em: 16/07/2012
- CATERPILLAR (2012b) Disponível em <<http://brasil.cat.com/>>. Acessado em: 16/07/2012
- CATERPILLAR (2012c) Disponível em <<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=484495&x=12>>. Acessado em: 17/07/2012
- CATERPILLAR (2012d) Disponível em <<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=308597&x=12>>. Acessado em: 17/07/2012
- CATERPILLAR (2012e) Disponível em

- <<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=308398&x=12>>. Acessado em: 17/07/2012
- CATERPILLAR (2012f) Disponível em
<<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=308648&x=12>> Acessado em: 17/07/2012
- CATERPILLAR (2012g) Disponível em
<<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=607800&x=12>>. Acessado em: 17/07/2012
- CATERPILLAR (2012h) Disponível em
<<http://brasil.cat.com/cda/layout?m=607801&x=12>>. Acessado em: 17/07/2012
- CHAO, L. (2001) Assessing Earth-Moving Operation Capacity by Neural Network-Based Simulation with Physical Factors. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 16, p. 287-294.
- CHAVES, C. R. (1955) *Terraplenagem Mecanizada*. Ed. Rodovia, Rio de Janeiro, RJ.
- CHENG, F. F.; WANG, Y. W.; LING, X. Z. e BAI, Y. (2004) A Petri Net Simulation Model for Virtual Construction of Earthmoving Operations. *Automation in Construction*, v. 20, p. 181-188.
- CNT (2010) *Pesquisa CNT de Rodovias 2010*. Confederação Nacional do Transporte, Brasília, DF.
- DEERE (2012) Disponível em
<http://www.deere.com/wps/dcom/en_US/products/equipment/scrapers/pull-type_scrapers/e_series_fixed-blade_ejector_scrapers/1810e/1810e.page>. Acessado em: 16/07/2012
- DNER (1997) *Glossário de Termos Técnicos Rodoviários*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2007) *Manual de Custos de Infra-estrutura de Transportes*. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Diretoria Geral, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2010) *Manual de Implantação Básica de Rodovia*. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.
- DYNAPAC (2012) Disponível em <<http://www.dynapac.com/pt-br/Produtos/?product=1013&cat=12>> Acessado em: 17/07/2012
- ELDRANDALY, R. e ELDIN, N. (2006) A Knowledge-Based Decision Support System for Scraper Selection and Estimation Cost. *The International Arab Journal of Information Technology*, v. 3, n. 4, p. 337-341.

- ELKINS MACHINERY (2012) Disponível em
<<http://www.elkinsmachinery.com/2011/02/15/623-super-f-series-ii/>>. Acessado em: 16/07/2012
- EL-MOSLMANI, K. (2002) *Fleet Selection for Earthmoving Operations Using Queueing Method*. Dissertação de Mestrado, Concordia University, Montreal, QC, Canadá.
- EL-MOSLMANI, K; ALKASS, S. e AL-HUSSEIN, M. (2002) A Computer Module for Multi-loaders-multi-trucks Fleet Selection for Earthmoving Projects. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Montréal, Québec, Canada, p. 1-10.
- GRANSBERG, D. D. (1989) Optimizing Haul Unit Size and Number Based on Loading Facility Characteristics. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 122, n. 3, p. 248-253.
- Haidar, A.; NAOUM, S.; HOWES, R. e TAH, J. (1999) Genetic Algorithms Application and Testing for Equipment Selection. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 125, n. 1, p. 32-38.
- HALPIN, D. W. e RIGGS, L. S. (1992) *Planning and Analysis of Construction Operations*. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- HEAVY EQUIPMENT (2012a) Disponível em
<<http://www.heavyequipment.com/heavy-equipment/earthmoving-mining>>
Acessado em: 26/07/2012
- HEAVY EQUIPMENT (2012b) Disponível em
<<http://www.heavyequipment.com/heavy-equipment/earthmoving-mining>>.
Acessado em: 17/07/2012
- HEAVY EQUIPMENT FORUMS (2012a) Disponível em
<<http://www.heavyequipmentforums.com/showthread.php?27433-Ripping-frost/page2>>. Acessado em: 16/07/2012
- HEAVY EQUIPMENT FORUMS (2012b) Disponível em
<<http://www.heavyequipmentforums.com/showthread.php?9015-Cat-Haul-Trucks-with-Bottom-Dumps>>. Acessado em: 17/07/2012
- HEAVY EQUIPMENT UPDATES (2012) Disponível em
<<http://www.heavyequipmentupdates.com/786/heavy-equipment/motor-scrapers/work-ready-caterpillar-627f-pushpull-motor-scraper>>. Acessado em: 16/07/2012
- HICKS, J.C. (1993) Haul-unit Performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 119, n. 3, p. 646-653.

- HSIAO, W.; LIN, C.; WU, H. e CHENG, T. (2011) A Hybrid Optimization Mechanism Used to Generate Truck Fleet to Perform Earthmoving Operations. *Geotechnical Special Publication*, n. 223, p. 151-159.
- KARSHENAS, S. (1989) Truck Capacity Selection for Earthmoving. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 115, n. 2, p. 212-227.
- LIMA, R. X. (2003) *Logística da Distribuição de Materiais em Pavimentação Rodoviária – Uma Modelagem em Programação Automática*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- LIMSIRI, C. (2011) Optimization of Loader-Hauler Fleet Selection. *European Journal of Scientific Research*, v. 56, n. 2, p. 266-271.
- MARZOUK, M. e MOSELHI, O. (2004) Fuzzy Clustering Model for Estimating Haulers' Travel Time. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 130, n. 6, p. 878-886.
- MATTOS, A. D. (2006) *Como preparar orçamentos de obras*. Ed. PINI, São Paulo, SP.
- MAYFIELD, J. C. (2004) *An Advisory System for Scraper Selection*. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- M&T (2010) Não existe “receita de bolo”.
- M&T (2011) – Anuário
- NEW HOLLAND (2012a) Disponível em <<http://latinamerica.construction.newholland.com/index.php>>. Acessado em: 16/07/2012
- NEW HOLLAND (2012b) Disponível em <<http://latinamerica.construction.newholland.com/index.php>>. Acessado em: 16/07/2012
- NUNNALLY, S. W. (2011) *Construction Methods and Management*. Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- PANABAR (2012) Disponível em <<http://www.panabar.net/834h.html>>. Acessado em: 16/07/2012
- PEURIFOY, R. L. (1975) Cost-reducing Analyses. *Journal of the Construction Division*, v. 101, n. 2, p. 299-307.
- PEURIFOY, R. L. e LEDBETTER, W. B. (1985) *Construction Planning, Equipment and Methods*. Ed. McGraw-Hill Book Co., New York, NY, USA.

- PEURIFOY, R. L.; SCHEXNAYDER, J. C.; SHAPIRA, A. e SCHMITT, R. L. (2011) *Construction, Planning, Equipment and Methods*. Ed. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- PRADO, D. (2009) *Teoria das Filas e da Simulação*. Ed. INDG Tecnologias e Serviços Ltda., Nova Lima, MG.
- PRATA, B. A.; NOBRE JÚNIOR, E. F. e BARROSO, G. C. (2007) Dimensionamento de equipes mecânicas em obras de terraplenagem usando redes de Petri coloridas, *XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Fortaleza, Brasil.
- RICARDO, H. S. e CATALANI, G. (2007) *Manual Prático de Escavação - Terraplenagem e Escavação de Rocha*. Ed. PINI, São Paulo, SP.
- TEREX (2012a) Disponível em <<http://www.terexconstruction.com/en/products/new-equipment/site-dumpers/power-swivel/ta5s/index.htm>>. Acessado em: 17/07/2012
- TEREX (2012b) Disponível em <<http://www.terexconstruction.com/en/products/new-equipment/trucks/off-highway-rigid-frame-trucks/tr45/index.htm>>. Acessado em: 17/07/2012
- TERRAPLENAGEM (2012) Disponível em <<http://www.terraplenagem.net/analises/caminhao/caminhao-agrale-13000>>. Acessado em: 17/07/2012
- TOURAN, A. (1990) Integration of Simulation with Expert System for Compactor Selection. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 116, n. 3, p. 338-348.
- VIA RURAL (2012) Disponível em <<http://br.viarural.com/construcao/escavadeiras-pas/caterpillar/carregadeiras-de-esteiras-973c.htm>>. Acessado em: 17/07/2012
- VOLVO (2012) Disponível em <http://www.volvoce.com/constructionequipment/brazil/br-pt/products/articulatedhaulers/A25F_A30F/Pages/A30F_specifications.aspx>. Acessado em: 17/07/2012
- XGGM-MACHINE (2012) Disponível em <<http://www.xggm-machine.com.pt/8-bulldozer-1.html>>. Acessado em: 16/07/2012
- XIE, T. X. (1997) *Using an Expert System for Earthmoving Equipment Selection and Estimation*. Dissertação de Mestrado, The University of New Brunswick, New Brunswick, Canadá.
- WIKIMEDIA (2012) Disponível em <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CatScapper627.jpg>>. Acessado em: 16/07/2012.