



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MARIA EDJANE DA SILVA SOARES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO NA SELEÇÃO
DE MOTONIVELADORAS PARA A EXECUÇÃO DE OBRAS DE
TERRAPLENAGEM E DE PAVIMENTAÇÃO**

FORTALEZA

2015

MARIA EDJANE DA SILVA SOARES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO NA SELEÇÃO
DE MOTONIVELADORAS PARA A EXECUÇÃO DE OBRAS DE
TERRAPLENAGEM E DE PAVIMENTAÇÃO**

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. Área de concentração: Infraestrutura de Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior

**FORTALEZA
2015**

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

-
- S655d Soares, Maria Edjane da Silva.
Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão na seleção de motoniveladoras para a execução de obras de terraplenagem e de pavimentação / Maria Edjane da Silva. Soares. – 2015.
80 f. : il. color. enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.
Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.
1. Transportes. 2. Pavimentos - Gerência. 3. Equipamentos - Seleção. 4. Obras rodoviárias. I.
Título.

MARIA EDJANE DA SILVA SOARES

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO NA SELEÇÃO DE
MOTONIVELADORAS PARA A EXECUÇÃO DE OBRAS DE TERRAPLENAGEM E
DE PAVIMENTAÇÃO

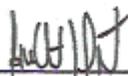
Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), da Universidade Federal do Ceará (UFC), como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transporte.

Aprovada em: 12/05/15

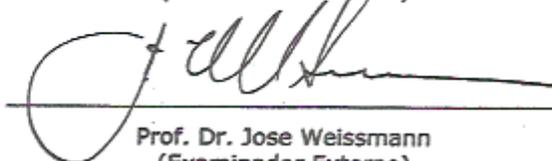
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior
(Orientador)



Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Jose Weissmann
(Examinador Externo)

A Deus, pelo que É e pelo que fez e faz.

Aos meus avós, Sebastião Soares (*in memoriam*), Júlia Bezerra (*in memoriam*), Raimundo Germano (*in memoriam*) e Hosana Gonçalves (*in memoriam*), pelo exemplo e amor.

Aos meus pais, João Batista e Edna Soares, pela dedicação e esforço a mim empregados.

Ao meu esposo Jhonny Makis, pela força e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo amor que tens me dado e por me guiar nos caminhos e escolhas da vida.

Ao professor Ernesto Ferreira Nobre Júnior, pela esplêndida orientação e paciência, além do incentivo e afeto por parte dele e de sua família para comigo.

À Capes pelo apoio a pesquisa.

Aos professores participantes da banca examinadora Bruno de Athayde Prata e José Weissmann pelo tempo dedicado e sugestões relevantes.

Aos professores e profissionais que fazem ou fizeram parte das instituições de ensino nas quais estudei - UFC, IFCE, UNIFOR - pela contribuição em minha formação.

A toda minha família, principalmente aos meus pais, João e Edna, pelo apoio, empenho, conselhos e amor a mim dedicados.

Aos meus avós, Sebastião Soares (*in memoriam*), Júlia Bezerra (*in memoriam*), Raimundo Germano (*in memoriam*) e Hosana Gonçalves (*in memoriam*), pelo carinho e incentivo, sei que estariam orgulhosos.

Ao meu marido Jhonny Makis, pela parceria, incentivo, companheirismo e amor.

Aos meus amigos por sempre torcerem pelo meu sucesso.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria; têm bom entendimento todos os que cumprem os seus preceitos; o seu louvor subsiste para sempre.”

Salmos 111:10

RESUMO

A velocidade de concepção e de execução das infraestruturas tem aumentado devido à utilização de *softwares* e equipamentos eficientes, o que tem exigido um melhor desempenho de cada etapa. No entanto, apesar dos custos envolvidos com equipamentos serem os itens de maior peso na construção rodoviária, poucos são os sistemas existentes de apoio à decisão para a seleção das frotas. Propostas de seleção de frotas têm sido elaboradas por pesquisadores no Brasil e no mundo, porém a maioria consideram apenas caminhões e escavadeiras/carregadeiras ou *scrapers*. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de apoio à decisão na seleção de motoniveladoras para a execução de obras de terraplenagem e de pavimentação, denominado SADPATROL. Inicialmente, foi feita uma análise da evolução tecnológica do equipamento motoniveladora visando verificar a influência destas melhorias sobre o aumento da produtividade. Foram analisadas as equações existentes na literatura para o cálculo de produtividade e após verificada a representatividade da equação utilizada no país esta foi escolhida para compor o SADPATROL, com as devidas alterações em suas variáveis. Através da análise de cada variável da equação foi possível identificar o quanto as mesmas influenciavam no resultado da produção desta forma, foram implementadas melhorias, como a inserção de valores padrões para as variáveis do sistema, permitindo a obtenção de resultados mais precisos, caso o usuário não possua dados medidos em campo. O SADPATROL possui cadastrado em seu banco de dados 46 tipos de motoniveladoras, dos mais variados modelos e tamanhos, de 12 fabricantes distintos. É possibilitado ao usuário calcular a frota com equipamentos próprios e verificar se esta atende ao prazo da obra. Caso o prazo não seja atendido pela frota própria ou o usuário não possua equipamentos, o sistema executa as informações da obra para todos os equipamentos do banco de dados e fornece a solução com as 46 opções organizadas em frotas, em ordem crescente de quantidade de equipamento. É possibilitado ainda selecionar os equipamentos nos quais se possui informação de custo horário, para assim obter a frota de menor custo. Toda a multiplicidade de informações necessárias à seleção de motoniveladoras, e suas inter-relações e dependências, foram organizadas de forma sistêmica no *software* SADPATROL, diminuindo assim o empirismo e a dependência da experiência humana na seleção de frotas. A presente pesquisa pode ainda contribuir para auxiliar a elaboração de normas técnicas e para a disseminação do conhecimento sobre o referido equipamento.

Palavras-chave: Gerência de Pavimentos. Seleção de Equipamentos. Obras Rodoviárias. Equipamentos de Construção. Sistemas de Apoio à Decisão.

ABSTRACT

The demands on speed and efficiency of infrastructure design and construction has increased due to the use of software and more productive equipment, which has required better performance of equipment planners at each step. However, even considering that the costs associated with equipment are one of the items with the greatest weight in road construction, there are few computerized systems for fleet selection decision support. Fleet selection systems have been developed by researchers in Brazil and worldwide, but most of them consider only trucks and excavators/loaders or scrapers. This research aims at developing a decision support system for the selection of motor graders for construction activities involving earthmoving and paving works named SADPATROL. Initially, an analysis of the motor grader technological evolution was performed in order to evaluate the influence of the improvements on productivity gains. The equations presented in the literature were studied for productivity calculation and, after verifying the suitability of the equation, the equation was incorporated in the SADPATROL system with the necessary changes in its variables. Through the analysis of the variables in the equation, it was possible to identify how they influenced the productivity. Through this analysis, improvements were implemented. These improvements consisted of the inclusion of standard values for the system variables, allowing the achievement of more accurate results if the user has no data for productivity measured in the field. The SADPATROL system has 46 types of motor graders included in its database, from many different models and sizes and from 12 different manufacturers. The user is able to plan the fleet with its own equipment and verify if it satisfies the construction project deadline. If the deadline cannot be satisfied using the available fleet or the user has no equipment, the system performs the construction planning using all database equipment and provides the optimal solution with 46 options organized into fleets in increasing order according to the amount of equipment needed. It is also possible for the user to select the equipment using time cost information and, thus, achieve the lowest cost fleet. The significant amount of information necessary for motor graders selection and its inter-relationships and dependencies were organized in a systematic way in the SADPATROL system, reducing, the empiricism and the dependence on human expertise in selecting fleets. This research may also help in assisting in the development of technical standards and expanding the dissemination of knowledge about such equipment.

Key-words: Pavement Management. Equipment Selection. Road work. Construction Equipment. Decision Support System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Composição do custo direto da obra	20
Figura 2.2 - Motoniveladora e seus componentes	26
Figura 2.3: Propaganda Niveladora Adams	28
Figura 2.4: Niveladora autopropelida Russell operando em torno de 1919	29
Figura 2.5: Niveladora autopropelida Champion de 1928	30
Figura 2.6: Munktell C1 produzido entre 1938 e 1940	30
Figura 2.7: N ^o . 9 Auto Patrol em Missoula, Montana	31
Figura 2.8: Interior da cabine de Caterpillar 120K, controle através de alavancas	32
Figura 2.9: Interior da cabine da Caterpillar 120M, controle através de joysticks	32
Figura 3.1: Angulação formada pela lâmina durante operações com motoniveladora.....	44
Figura 4.1: Tela inicial do SADPATROL	63
Figura 4.2: Tela de dados para produção de equipamento específico	63
Figura 4.3: Dados da verificação inseridos no sistema	64
Figura 4.4: Relatório emitido pelo sistema	65
Figura 4.5: Tela inicial do sistema – opção Seleção de Frota para Obra	66
Figura 4.6: Tela de dados para Seleção de Frota para Obra	67
Figura 4.7: Tela de dados para frota própria do usuário	68
Figura 4.8: Dados do exemplo de aplicação inseridos no sistema	68
Figura 4.9: Resultado da verificação de frota e dimensionamento do exemplo de aplicação.	70
Figura 4.10: Resultado do dimensionamento organizado por custo.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo porcentagens componentes custos unitários	20
Tabela 3.1: Dados de produção de equipe mecânica para serviços de compactação	39
Tabela 3.2 - Fatores e características da motoniveladora Caterpillar 120G	40
Tabela 3.3 - Variáveis consideradas pelo SICRO para o cálculo de produtividade da motoniveladora em serviços de Compactação de Aterros a 95 % Proctor Normal	42
Tabela 3.4 - Variação de comprimento e angulação de lâmina de motoniveladoras e as produções geradas	45
Tabela 3.5 - Variação de velocidade de operação de motoniveladoras e as produções geradas	47
Tabela 3.6 - Variação de número de passadas em operações de motoniveladoras e as produções geradas	48
Tabela 3.7 - Variação do fator de eficiência em operações de motoniveladoras e as produções geradas	49
Tabela 4.1 - Faixas de velocidade, espessura e angulação citadas na literatura e valores médios adotados no sistema, conforme tipo de serviço	57

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

μ	Média aritmética
3D	3 Dimensões
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABDER	Associação Brasileira dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem
CV	Coefficiente de variação
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Earthmoving E.S.P.	<i>Earthmoving Equipment Selection Pro</i>
EESSET	<i>Earthmoving Equipment Selection and Estimation Tool</i>
ESEMPS	<i>Expert System for Earth-moving Plant Selection</i>
EUA	Estados Unidos da América
EXCselector	<i>Excavator Selector</i>
EXSYS	<i>Professional Expert System Professional</i>
FLSELECTOR	<i>Fleet Selector</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HP	<i>Horsepower</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MVC	<i>Model View Controller</i>
MVLR	<i>Multivariate Linear Regression - Regressão Linear Multivariada</i>
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
SADPATROL	Sistema de Apoio à Decisão de Motoniveladoras / Patrol
S	Desvio Padrão
SE	Sistemas Especialistas
SICRO	Sistema de Custos Rodoviários
SISEQ	Sistema para Seleção de Equipamentos
UVER	<i>Univariate Exponential Regression - Regressão Exponencial</i> Univariável
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XI
CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. APRESENTAÇÃO E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	15
1.2. PROBLEMA DA PESQUISA	16
1.3. OBJETIVOS	17
1.3.1. Objetivo Geral	17
1.3.2. Objetivos Específicos	17
1.4. ETAPAS DA PESQUISA	18
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
CAPÍTULO 2	20
2. A SELEÇÃO DE FROTAS DE EQUIPAMENTOS E A MOTONIVELADORA E SUA OPERAÇÃO	20
2.1. CUSTOS COM EQUIPAMENTOS EM CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA	20
2.2. SISTEMAS PARA SELEÇÃO DE FROTAS	21
2.3. O EQUIPAMENTO MOTONIVELADORA	26
2.4. A INFLUÊNCIA DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DA MOTONIVELADORA NO AUMENTO DA PRODUTIVIDADE	27
2.5. OPERAÇÕES DA MOTONIVELADORA NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA	33
2.6. CÁLCULO DE PRODUÇÃO DA MOTONIVELADORA	36
CAPÍTULO 3	38

3. ANÁLISE DO MODELO E VARIÁVEIS UTILIZADOS NO BRASIL	38
3.1. O CÁLCULO DE PRODUÇÃO E SELEÇÃO DE MOTONIVELADORAS NO SISTEMA BRASILEIRO	38
3.2. A MOTONIVELADORA NO SISTEMA BRASILEIRO	40
3.3. O MODELO DE CÁLCULO DE PRODUÇÃO UTILIZADO NO BRASIL ...	41
3.4. . O MODELO DE MOTONIVELADORA UTILIZADO COMO PADRÃO ...	42
3.5. A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NO CÁLCULO DA PRODUTIVIDADE	43
3.5.1. Comprimento de lâmina	43
3.5.2. Velocidade média	46
3.5.3. Número de passadas	47
3.5.4. Fator de eficiência	48
3.6. CONCLUSÕES DA ANÁLISE DO MODELO E SUAS VARIÁVEIS	50
CAPÍTULO 4	52
4. O SISTEMA DE SELEÇÃO DE MOTONIVELADORAS	52
4.1. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA	52
4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO E SUAS VARIÁVEIS	53
4.2.1. Modelo matemático	53
4.2.2. Equipamentos considerados e banco de dados	53
4.2.3. Variáveis utilizadas no cálculo	54
4.2.3.1 Angulação de lâmina, Velocidade de execução de serviços e Espessura.....	54
4.2.3.2 Número de passadas	57
4.2.3.3 Fator de eficiência	58
4.3. CÁLCULO DE VERIFICAÇÃO DO PRAZO DE EXECUÇÃO E DO NÚMERO DE EQUIPAMENTO QUE ATENDE AO PRAZO	58
4.4. CÁLCULO DE VOLUME SOLTO PARA OPERAÇÕES DE ESPALHAMENTO E MISTURA DE MATERIAIS	60
4.5. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	61
4.6. VERIFICAÇÃO DO SISTEMA	62

4.7. APLICAÇÃO DO SISTEMA	65
CAPÍTULO 5	74
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	74
5.1 CONCLUSÕES	74
5.2 LIMITAÇÕES DO SISTEMA	75
5.3 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	76
REFERÊNCIAS	77

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada a motivação desta pesquisa, os objetivos do trabalho, as etapas realizadas e metodologias adotadas para a obtenção dos resultados e a estrutura do texto da Dissertação.

1.1. APRESENTAÇÃO E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Uma das etapas de terraplenagem que mais requer perícia e atenção é o nivelamento, devido ao nível de precisão exigido em sua execução. Além da necessidade de um bom operador, há ainda o alto custo do equipamento, que introduz um valor considerável na composição dos custos. Apesar da complexidade e dos custos envolvidos no uso da motoniveladora, na literatura técnica há poucas pesquisas relacionadas ao rendimento, seleção e quantidades de equipamentos e mão-de-obra necessários à realização dos serviços que a envolva. Devido à escassez de material sobre o tema e considerando as restritas bases de dados dos estudos realizados até o momento no meio técnico e científico, busca-se através desta pesquisa, uma resposta para a questão da produtividade e da seleção de motoniveladoras, para a adequada realização dos serviços.

A maioria dos estudos relacionados à mesma tem por base o Manual de Produção Caterpillar (CATERPILLAR, 2009). Até mesmo o Manual de Custos Rodoviários (DNIT, 2003b) utiliza-se daquele documento como fundamentação para os cálculos de produtividade de motoniveladoras. Porém, no mercado há diversas máquinas com porte, forma de controle, entre outras características, diferentes entre si o que torna essa informação bastante genérica, diminuindo a precisão nos resultados (KOMATSU, 2007; CONSTRUCTION, 2012; VOLVO, 2006).

Em meio aos atuais avanços tecnológicos e devido à utilização de *softwares* nas diversas etapas construtivas, como a de projeto, a de cálculo de estruturas e a de orçamento, dentre outras, a velocidade de concepção e de execução das infraestruturas aumentou. Estas etapas, por outro lado, têm exigido o melhor desempenho possível das equipes (equipamentos e mão-de-obra). No entanto, ainda não há um sistema adequado e confiável para apoiar as decisões relativas à quantidade de equipamentos a ser utilizada em cada fase do projeto.

Os Sistemas de Apoio à decisão - SAD são sistemas computacionais que visam sistematizar e apoiar os processos decisórios empresariais, sendo comumente compostos pelos

mesmos componentes básicos como: interface com o usuário, banco de dados e banco de modelos, visando fornecer apoio em decisões semi-estruturadas e desestruturadas, estando sob controle do tomador de decisões e disponibilizando um conjunto de ferramentas para estruturar e aumentar a efetividade das decisões (JUNIOR et al., 2006 *apud* TAVARES, 2008).

Visando suprir a necessidade de apoio à decisão em seleção de equipamentos, pesquisas vêm sendo realizadas no meio científico. Podem-se citar as desenvolvidas por Alkass e Harris (1988), Alkass *et al.* (2003) e a de Alshibani e Moselhi (2012). Porém, a maioria consideram apenas caminhões e escavadeiras/carregadeiras ou scrapers. No Brasil, o estudo realizado por Barbosa (2012) propõe este tipo de abordagem através do desenvolvimento do *software* denominado SISEQ. O referido sistema também considera somente alguns dos equipamentos anteriormente citados, no processo de execução da terraplenagem e da pavimentação. Em Portugal, foi desenvolvida por Calhau (2013) uma pesquisa relativa à seleção de equipamentos, todavia abrangendo apenas escavadeiras.

A motoniveladora não é contemplada por esses sistemas, apesar de ser um equipamento versátil e bastante utilizado no país, de fundamental importância na finalização da terraplenagem (RICARDO e CATALANI, 2007), a mesma pode ser utilizada em diversas atividades como manutenção dos caminhos de serviço, conformação dos taludes de corte, abertura de valetas de drenagem superficial, espalhamento e regularização das camadas a serem compactadas nos aterros, ou das camadas constituintes do pavimento (DNIT, 2005, 2009a e 2009b).

O presente estudo visa desenvolver um sistema para a seleção de motoniveladoras, realizando-se uma pesquisa aprofundada do cálculo da produção e seleção, com a avaliação dos modelos matemáticos consistentes para tal, criando ainda um banco de dados com os equipamentos e as devidas características dos mesmos que influenciam na produtividade, assim, obtendo mais precisão nos resultados de produção. A pesquisa busca ainda contribuir para a criação de um referencial teórico que possa auxiliar a elaboração de normas técnicas e a disseminação do conhecimento sobre o referido equipamento.

1.2. PROBLEMA DA PESQUISA

Mesmo com os altos valores que os equipamentos representam dentro do orçamento de construções, a seleção de frotas que melhor atendam as necessidades com menor custo ainda não é uma realidade no planejamento de obras. A má definição de como

aferir a produção dos equipamentos e os fatores que a influenciam, provavelmente sejam as causas da estagnação desta etapa de planejamento. O empirismo ainda empregado durante a escolha da frota aumenta a chance de superdimensionamento ou subdimensionamento, ambos causando prejuízos tanto financeiros como de desenvolvimento do cronograma na obra. Portanto o problema de pesquisa pode ser resumido na seguinte questão:

Como dimensionar uma frota de equipamentos, motoniveladoras, para a execução de serviços, atendendo aos prazos estabelecidos e com o melhor custo-benefício?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão na seleção de motoniveladoras para a execução de obras de terraplenagem e de pavimentação.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos se resumem em:

- a) elaborar estudos sobre o equipamento, desde sua criação, passando pelas evoluções tecnológicas que o mesmo sofreu até os tempos atuais, suas funções, operações, potencial e limitações no uso para serviços de terraplenagem e de pavimentação;
- b) pesquisar sobre os processos construtivos e os fatores que influenciam na produtividade de motoniveladoras, nas atividades de terraplenagem e de pavimentação;
- c) analisar a produção do equipamento e os modelos matemáticos a ela associados;
- d) selecionar modelo matemático mais representativo para o cálculo de produtividade do equipamento, considerando-se todas as variáveis relevantes ao mesmo;

- e) criar, para inserção no sistema, um banco de dados relacionando os modelos existentes do equipamento no mercado, com as características relativas à sua produtividade;
- f) criar um sistema que agregue todas as informações relativas ao equipamento, e que correlacione as mesmas para obtenção das variáveis necessárias ao cálculo da produtividade, e avalie qual a melhor solução de frota para determinada obra;
- g) testar e aplicar o sistema desenvolvido.

1.4. ETAPAS DA PESQUISA

As etapas necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa foram as seguintes:

- a) revisão bibliográfica;
- b) avaliação do modelo matemático para o cálculo de produtividade do equipamento motoniveladora;
- c) criação do banco de dados com as características das principais motoniveladoras;
- d) implementação do modelo matemático através de ferramentas computacionais;
- e) aplicação do sistema desenvolvido;
- f) análise e discussão dos resultados;
- g) conclusão da pesquisa.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, conforme a seguir apresentados.

No Capítulo 1 são apresentadas a motivação desta pesquisa, os objetivos do trabalho, as etapas realizadas, as metodologias adotadas para a obtenção dos resultados e a estrutura do texto da dissertação.

No Capítulo 2 são apresentados os sistemas de seleção de frota existentes, a caracterização do equipamento motoniveladora, suas funções e forma de operação nos serviços que realiza em construções rodoviárias, além da análise das evoluções tecnológicas implementadas à mesma para o aumento de produtividade. Apresenta-se ainda o cálculo de produção do equipamento descrito na literatura e o utilizado no Brasil atualmente.

No Capítulo 3 é avaliado o modelo matemático utilizado para o cálculo de produtividade de motoniveladoras no sistema brasileiro e suas variáveis, de modo a identificar os dados necessários à realização do sistema, os campos de abrangência de cada variável e os pontos de melhoria, para se obter a maior precisão possível.

No Capítulo 4 é apresentado o Sistema de Seleção de Motoniveladoras desenvolvido, e detalhado o seu funcionamento. É apresentado desde o modelo matemático utilizado e suas variáveis até o banco de dados, de onde as informações do equipamento são coletadas. Ainda neste capítulo é feito o teste de validação.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas com a presente pesquisa, apresentadas as potencialidades e limitações do sistema resultante da mesma e são feitas ainda neste capítulo recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

A SELEÇÃO DE FROTAS DE EQUIPAMENTOS E A MOTONIVELADORA E SUA OPERAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os sistemas de seleção de frota existentes. É caracterizado ainda o equipamento motoniveladora, suas funções e forma de operação nos serviços que realiza em construções rodoviárias, além da análise das evoluções tecnológicas implementadas à mesma para o aumento de produtividade e apresentado o cálculo de produção do equipamento descrito na literatura e o utilizado no Brasil atualmente.

2.1. CUSTOS COM EQUIPAMENTOS EM CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA

Os custos com equipamentos são bastante expressivos nas construções rodoviárias, principalmente nas etapas de terraplenagem e pavimentação. A Tabela 2.1 apresenta porcentagens de componentes de custos unitários do estudo de Pedrozo (2001).

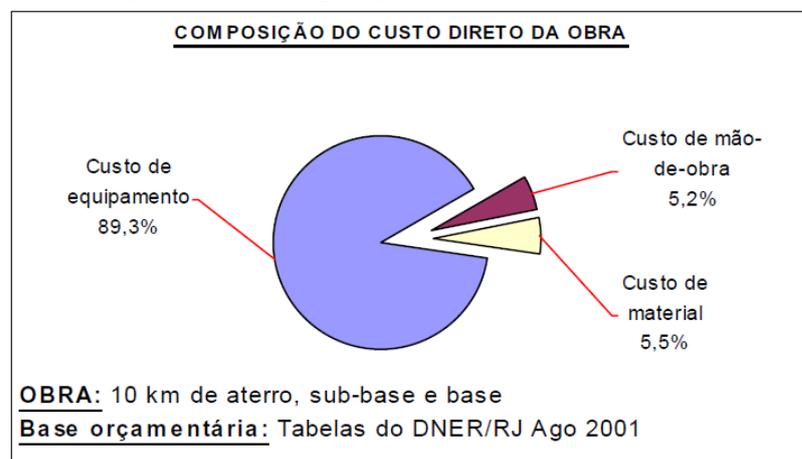
Tabela 2.1: Resumo porcentagens componentes custos unitários.

	Materiais	Mão-de-obra	Equipamentos	Transportes
Terraplenagem	18%	15%	52%	15%
Pavimentação	74%	3%	19%	4%
Drenagem	69%	23%	4%	4%

Fonte: Pedrozo (2001).

Dependendo do tipo de serviço realizado os custos com equipamentos podem chegar até próximo de 90% como apresentado por Figueiredo (2001) na Figura 2.1.

Figura 2.1: Composição do custo direto da obra.



Fonte: Figueiredo (2001).

Em sua pesquisa Figueiredo (2001) analisou o detalhamento dos gastos de algumas obras e verificou que o custo com equipamentos e viaturas é parcela bastante significativa na estrutura de custos das mesmas, desta forma a gestão de custos destas obras, precisa considerá-los sob uma ótica especial.

Como vários trechos utilizam os equipamentos trabalhando em ciclos repetidos e executando as mesmas tarefas, logo a otimização dos processos, a redução ou, o melhor aproveitamento de um equipamento da frota, sem perda de produtividade, pode parecer mínimo em uma execução, porém devido às inúmeras repetições inerentes à construção rodoviária, promove um alto ganho ao final.

Devido aos altos custos envolvidos, existe ainda a necessidade de pesquisas voltadas para uma melhor utilização dos equipamentos e conseqüente redução dos seus custos. Muito ainda se pode melhorar nesse quesito e dessa forma evitar gastos desnecessários nas obras rodoviárias brasileiras.

2.2. SISTEMAS PARA SELEÇÃO DE FROTAS

A seleção adequada de equipamentos pode reduzir os custos, evitando tanto a ociosidade de máquinas como a falta delas. Na busca de uma seleção de frotas mais precisa e menos dependente do fator experiência humana, nas últimas décadas algumas pesquisas vem sendo desenvolvidas para a implementação de tal conhecimento em *softwares*, capazes de correlacionar as variáveis que influem em uma seleção e dessa forma apresentar as soluções mais adequadas ao usuário.

A estimativa das taxas de produção de máquinas é fortemente dependente de dados históricos das companhias e das opiniões de especialistas. Além dessas fontes, as taxas de produção em manuais e informações de fornecedores de equipamentos são muitas vezes utilizadas como referência para a estimativa. No entanto, as taxas de produção são muitas vezes aceitas como sendo exatas de ano para ano, independentemente da situação real e não são frequentemente verificadas (XIE, 1997). Os fatores que afetam a produtividade podem variar de acordo com o tipo e modelo de equipamento, como também conforme a obra e fatores externos, por exemplo, dimensões, materiais, clima, entre outros e há a necessidade dessa adaptação para cada situação, caso contrário o dimensionamento das frotas pode ser impreciso.

Para Xie (1997), o processo de selecionar equipamentos de terraplenagem e estimar a sua produção e os custos é um processo dinâmico e abrangente, envolvendo análises

quantitativas e qualitativas. Para obter um elevado nível de desempenho do equipamento de terraplanagem, a escolha da máquina adequada e a estimativa precisa de produção e custos são particularmente importantes. A seleção e a estimativa de máquinas de terraplanagem são muito dependentes do conhecimento e da experiência humana. No entanto, esse conhecimento pode ser limitado pela experiência pessoal em organizações específicas e resultar em inconsistência ou imprecisão na seleção e estimativa de equipamentos para terraplanagem.

A multiplicidade e interdependência de fatores envolvidos na análise e seleção de equipamentos, somado ao empirismo contido na seleção tradicional realizada através da experiência de profissionais, são motivos para impulsionarem as pesquisas em busca de se desenvolver Sistemas Especialistas (SE), e através destes acumular conhecimento, armazenando-o para utilizá-lo de forma sistêmica e atualizada quando necessário.

Os Sistemas Especialistas nada mais são do que ferramentas que interagem com o usuário por meio de uma série de perguntas sobre os dados da obra e apresentam como resultado recomendações dos equipamentos mais adequados para as condições informadas e determinam a produção e custos de produção das equipes. Os diversos Sistemas Especialistas existentes diferenciam-se geralmente pelos tipos de equipamentos considerados, pelo algoritmo de análise e pelos parâmetros apresentados como resultados (BARBOSA, 2012).

Segundo Barbosa (2012) no quesito inteligência artificial, outras técnicas têm sido aplicadas, como algoritmos genéticos (HAIDAR *et al.*, 1999; HSIAO *et al.*, 2011; LIMSIRI, 2011), redes neurais (CHAO, 2001), redes de Petri (PRATA *et al.*, 2008; CHENG *et al.*, 2011) e lógica *fuzzy* (MARZOUK e MOSELHI, 2004). O autor ainda cita outra técnica bastante empregada, desde a década de 1960, a Teoria das Filas, como uma técnica 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 *et al.*, 2002).

Para Alkass e Harris (1988) sistemas baseados em conhecimento (sistemas especialistas) geram interesse como potenciais auxílios à tomada de decisão. Tais pesquisadores desenvolveram o sistema ESEMP (Expert System for Earth-moving Plant Selection) para a seleção de máquinas de terraplanagem para a construção de estradas. O conhecimento para este fim foi obtido por meio de profissionais de campo, como engenheiros de planejamento e especialistas de equipamentos. O sistema abrange diversos equipamentos como scrapers, tratores de esteiras, escarificadores, draglines, retroescavadeira, entre outros e provê ainda recursos como a utilização de lógica *Fuzzy* usando a teoria da

probabilidade, fornece rotinas de cálculos e permite o acesso a programas externos e a bases de dados (ALKASS e HARRIS, 1988).

Touran (1990) em seu estudo sobre compactadores afirma que na maioria das vezes a seleção por meio da experiência e intuição do engenheiro da construção também ocorre na seleção desse tipo de equipamento. Em sua pesquisa ele desenvolveu um Sistema Especialista que ajuda na escolha do compactador mais adequado conforme um conjunto de condições de trabalho. O sistema desenvolvido leva em consideração o grau de compactação necessária, tamanho do trabalho, tipo de solo, a plasticidade, condições de umidade, e quebra de agregados. Recomendações feitas pelo Sistema Especialista aplica-se a trabalhos específicos para densidades padrão AASHTO (TOURAN, 1990).

Amirkhanian e Baker (1992) utilizaram um Sistema Especialista, baseado em 930 regras, para desenvolver um sistema de escolha de equipamentos de terraplenagem. O sistema intitulado *Earthmoving E.S.P. (Earthmoving Equipment Selection Pro)* interpreta a informação relativa às condições de solo de um determinado projeto, o desempenho do operador, e as operações de movimentação de terras necessárias. É possível selecionar 14 diferentes tipos de equipamentos, incluindo tratores de esteira, pás carregadeiras, carregadeiras de esteiras, escavadeiras, retroescavadeiras, motoniveladoras, rolos compactadores, entre outros. Porém, para alguns tipos particulares de equipamentos (ex.: motoniveladora, retroescavadeiras, e escavadeira de lança telescópica) a produtividade não é calculada. Os especialistas estabeleceram um número específico de cada um destes tipos de equipamento de acordo com o tamanho geral do projeto (AMIRKHANIAN e BAKER, 1992).

Segundo Xie (1997) o processo de seleção e estimativa de máquinas de terraplenagem, baseia-se fortemente na experiência e conhecimento humano devido a inúmeros fatores que influenciam a seleção. Em sua pesquisa o autor aborda os aspectos importantes da seleção e estimativa de equipamentos de terraplanagem. Experiência e conhecimento realístico no processo de terraplanagem foram adquiridos através do envio de questionários à contratantes no Canadá e nos Estados Unidos e entrevista com especialistas. Ao investigar os problemas existentes na realidade, um modelo matemático para a produção de equipamentos de terraplenagem e estimativa de custos foi proposto e implementado no Sistema Especialista desenvolvido, o EESET (*Earthmoving Equipment Selection and Estimation Tool*) foi construído utilizando o programa EXSYS *Professional*. O sistema contém uma base de conhecimento e três bases de dados, tem a capacidade de selecionar frotas de máquinas adequadas, a partir de sessenta máquinas consideradas no sistema, e calcula os seus resultados e os custos com base nas condições de trabalho fornecidas. Através

de uma rotina de consulta relativamente fácil de pergunta-resposta, recomendações com resultados relevantes podem ser feitas rapidamente e apresentadas pelo sistema (XIE, 1997).

El-Moslmani *et al.* (2002) desenvolveram um modelo computacional chamado de FLSELECTOR (*Fleet Selector*) utilizado para ajudar na escolha da frota de equipamento (carregadeiras e caminhões) apropriado, ou seja, tecnicamente viável, e permitindo a escolha de frota com saída ideal (menor custo, produção máxima, ou duração mínima de projeto). Com base em dados de entrada do usuário em relação às características do projeto e dos tipos de carregadores selecionados, o modelo calcula o desempenho do equipamento e realiza o processo de seleção. O modelo combina o tipo selecionado de carregador com os diferentes tipos de caminhões disponíveis, a fim de selecionar os mais adequados para trabalhar com o carregador. Diferentes configurações de frota são listadas, a produção é calculada para cada combinação usando o método de filas para obter a seleção da frota ideal, e é realizada uma classificação das dez melhores frotas de acordo com a produção, custo, duração e disponibilidade (EL-MOSLMANI *et al.*, 2002).

Segundo Eldin e Mayfield (2005), que pesquisaram *scrapers*, as taxas de produção destes equipamentos variam amplamente, pois dependem do desempenho do equipamento, do tempo de viagem da operação e das condições das vias de trabalho. Determinar a seleção mais econômica de tamanho, modelo e número de *scrapers* é um processo bastante laborioso que envolve cálculos repetitivos. Os autores desenvolveram uma planilha para facilitar tais cálculos e selecionar o *scraper* mais econômico a partir da lista de equipamentos disponíveis para o trabalho em questão. A aplicação é constituída de sete planilhas contendo um banco de dados de *scrapers*, gráficos de desempenho, propriedades do solo e outras planilhas de apoio. O aplicativo oferece uma interface de usuário para solicitar todas as entradas de dados específicos de um projeto. Uma vez que o usuário insere os dados necessários, o sistema compara a taxa de produção, o tempo necessário para o trabalho, determina o custo unitário estimado para cada *scraper* no banco de dados, e recomenda a seleção mais econômica (ELDIN e MAYFIELD, 2005).

Outras pesquisas que também buscam o desenvolvimento de Sistemas Especialistas para a seleção de *scrapers* são a de Kuprenas e Henkhaus (2000) e a de Eldrandaly e Eldin (2006), esta última utilizando programação orientada a objetos.

Moselhi e Alshibani (2009) desenvolveram um modelo de otimização de operações de terraplenagem em projetos de construção pesada, que utiliza algoritmo genético, programação linear e sistemas de informação geográfica para apoiar suas funções de gestão. O modelo auxilia no planejamento de operações de terraplenagem, levando-se em

consideração: disponibilidade de recursos para os contratantes; restrições de orçamento e/ou tempo de projeto, se houver; escopo de trabalho; as condições do local de construção; o tipo de solo; custos indiretos; e características do equipamento. O modelo também determina as quantidades de terra a ser movido a partir de diferentes câmaras de empréstimo e as que devem ser colocados em diferentes aterros, para cumprir o objetivo de otimização definido pelo usuário e para atender às restrições do projeto. O modelo foi implementado no *software*, usando programação orientada a objetos (MOSELHI e ALSHIBANI, 2009).

Na pesquisa de Jrade e Markiz (2012) foi proposto um modelo que foi desenvolvido em um ambiente da Microsoft utilizando o *Visual Basic for Applications*® (VBA), capaz de ser integrado com outras estimativas e modelos de otimização ou de simulação. A implementação do modelo fornece frota equipamento ideal para executar operações de terraplanagem com base na sua análise da operação econômica, proporcionando ao usuário um relatório final otimizado que inclui opções de propriedade e de aluguel (JRADE e MARKIZ, 2012).

Em sua pesquisa Barbosa (2012) apresenta a ferramenta computacional denominada de Sistema para Seleção de Equipamentos de Terraplanagem e Pavimentação (SiSEq), que pode, a partir das informações de projeto, permitir ao tomador de decisão escolher a frota ideal de equipamentos. O SiSEq apresenta como resultado cenários de configurações de frotas, com produções dos equipamentos, número de unidades necessárias para atender ao prazo e custos de produção. O sistema engloba escavadeiras, carregadeiras e caminhões e ainda realiza duas análises complementares, 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 (BARBOSA, 2012).

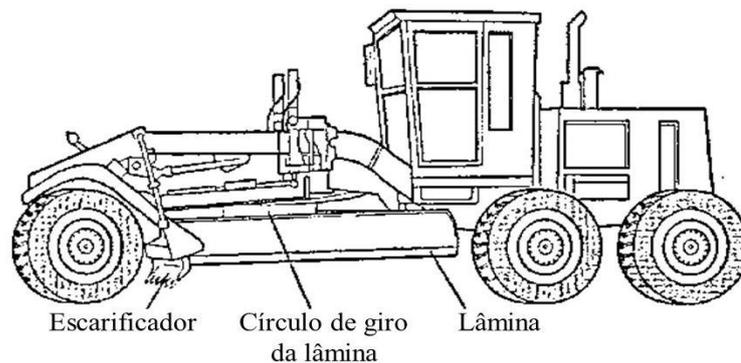
Calhau (2013) também apresenta uma solução para a seleção de escavadeiras com um método para o cálculo de custos horários, com recurso a regressão exponencial univariável (UVER) e a regressão linear multivariada (MVLRL), e ainda a concepção do *software EXCselector*, para o cálculo de produtividade e custos horários/unitários de escavação, para tal, definem-se critérios normalizados para a caracterização e seleção de equipamentos de escavação; faz-se a análise dos materiais de escavação; definem-se parâmetros de produção; aplica-se um modelo determinístico para os cálculos de produção e custos; e faz-se o levantamento de equipamentos existentes no mercado, reunindo as suas características, preços e serviços prestados pelos representantes das marcas (CALHAU, 2013).

Neste t3pico foram descritos alguns dos sistemas de apoio 3 a decis3o para sele3o de equipamentos desenvolvidos nas 3ltimas d3cadas. Por3m, o aumento da velocidade de execu3o em cada etapa das constru3o3es tem exigido cada vez mais que a etapa de sele3o de frotas seja r3pida e precisa, o que impulsiona as pesquisas para a automa3o da mesma por meio de ferramentas computacionais.

2.3. O EQUIPAMENTO MOTONIVELADORA

As motoniveladoras (Figura 2.2) s3o equipamentos extremamente vers3teis, devido a possibilidade de serem utilizadas na execu3o das mais diversas tarefas. A ISO 6165:2012 a define como uma m3quina autopropulsora de rodas que possui uma l3mina regul3vel localizada entre os eixos dianteiro e traseiro, que pode ser equipada com uma l3mina montada na dianteira ou escarificador que tamb3m pode estar localizado entre os eixos dianteiro e traseiro.

Figura 2.2: Motoniveladora e seus componentes.



Fonte: Peurifoy *et al.* (2010)

Baesso e Gon3alves (2003) acrescentam que a mesma 3 tamb3m conhecida como Patrol e possui uma moviment3o livre em quase todos os sentidos de modo a permitir seu emprego nas mais variadas posi3o3es, constituindo-se em instrumento indispens3vel a quase todos os servi3os envolvendo terraplenagem de um modo geral.

Chaves (1955) classifica o equipamento como Unidades Aplainadoras, termo este utilizado ainda nos tempos atuais, sendo citado por Ricardo e Catalani em 2007. J3 Guimar3es (2001) as classificava como Unidades Niveladoras. Chaves (1955) define essas Unidades Aplainadoras como sendo todas as m3quinas e equipamentos empregados em raspagem, aplainamento ou acabamento de superf3cies em terraplenagem, e que fazem parte dessa classifica3o as plainas rebocadas e plainas autopropulsoras. O termo plaina foi utilizado

também por Pereira (1961) que mencionou poderem as plainas serem rebocadas por um trator ou autopropelidas, a esta última denominou auto-patrol. Chaves (1955) classifica o equipamento como Unidade Aplainadora, termo este ainda hoje utilizado, como registrado em Ricardo e Catalani (2007). Já Guimarães (2001) a classifica como Unidade Niveladora. Chaves (1955) define essas Unidades Aplainadoras, como sendo todas as máquinas e equipamentos empregados em raspagem, aplainamento ou acabamento de superfícies em terreplenagem, e fazem parte dessa classificação as plainas rebocadas e as plainas autopropulsoras. O termo plaina foi utilizado também por Pereira (1961) que mencionou poderem as plainas serem rebocadas por um trator ou autopropelidas, a esta última denominou auto-patrol.

As plainas rebocadas foram as antecessoras das motoniveladoras atuais e funcionavam inicialmente à tração animal, passando posteriormente a serem rebocadas por tratores.

No tópico seguinte será feita uma abordagem sobre a evolução da motoniveladora sob o aspecto das consequências da influência da evolução tecnológica dos componentes da motoniveladora no aumento da sua produtividade.

2.4. A INFLUÊNCIA DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DA MOTONIVELADORA NO AUMENTO DA PRODUTIVIDADE

Segundo Guimarães (2001) o perfeito desempenho das superfícies de leitos naturais de rodovias sempre foi uma condição exigida não só para melhorar as condições de conforto para o viajante, como também para oferecer melhores condições de desempenho ao veículo, atenuando avarias mecânicas em consequência das superfícies irregulares. Com o advento dos veículos motorizados a conformação das superfícies das rodovias se tornou uma operação rotineira.

Na área de engenharia mecânica, a niveladora foi um dos equipamentos especialmente desenvolvidos para atender a essa necessidade. Nos EUA, a primeira niveladora rebocada de dois eixos (a “American Champion”) fora patenteada por Samuel Pennock, em 1877, sendo utilizada até a década de 1940 (VELOSO, 2013b). Desde sua invenção uma série de melhorias e implementos foram acrescentados ao equipamento com um único objetivo, o “aumento de produtividade”. Tanto que as publicidades em torno do equipamento sempre destacavam a melhoria de capacidade produtiva advinda da tecnologia empregada, como mostra a Figura 2.3, uma das primeiras publicidades sobre motoniveladoras, publicada em 1911.

O sistema de inclinação de rodas introduzido por Adams em 1885 foi uma das primeiras implementações feitas para melhorar a operação e conseqüentemente a produção do equipamento, foi um grande avanço para a época e conseguiu resultados tão significativos que até hoje é empregado, porém com um controle mais moderno, o hidráulico, que substituiu o manual.

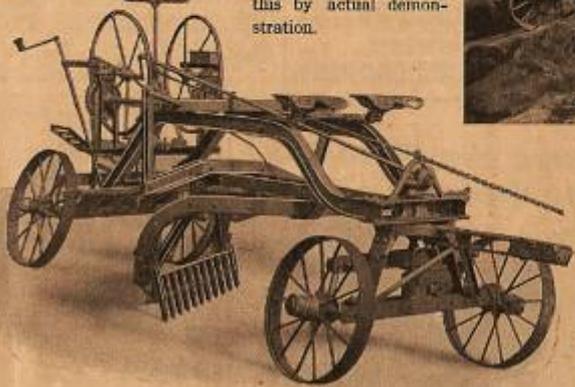
Figura 2.3: Propaganda Niveladora Adams.

January, 1911 THE AMERICAN THRESHERMAN 47

DON'T READ THIS

unless you can believe that 2 and 2 are 4.

If you were pushing a loaded wheelbarrow up hill would you lean toward the load or away from it? The adjustable leaning wheels of the Road King Grader lean up hill toward the load, thereby throwing the weight of the machine in opposition to the side pressure of the earth against the mould board. Hence the Road King does not slide sidewise as other graders do and absolutely no power is wasted in overcoming side draft or other losses. The Road King will do at least one half more work than any other grader with the same power. We prove this by actual demonstration.

Don't throw away money by putting more new material on your old macadam or gravel roads, but let the Road King Scarifier simply reshape them. The illustration on the left shows the Road King with Scarifier attached, the mould board having been removed.

We make leaning wheel road graders of various sizes. The Road King is suitable for either eight horses or engine power.

GOOD AGENTS WANTED

J. D. Adams & Co.,
Dept. T., Indianapolis, Ind.

Illustration The American Thresherman

Fonte: LORENTZ (2014)

Outra melhoria significativa foi a substituição da força animal pelos tratores de esteiras que aumentaram significativamente a capacidade de tração e a velocidade de operação (VELOSO, 2013b). Porém ainda havia a necessidade de dois operados na execução dos serviços (um no trator e outro na niveladora), além dos perigos no controle da lâmina manual. Esses fatos impulsionaram as tentativas de se criar um equipamento autopropelido, que pudesse ser controlado por uma única pessoa, juntamente com a introdução do controle assistido da lâmina.

Atribue-se a *Russell Grader Manufacturing Company* (posteriormente adquirida pela *Caterpillar*) o desenvolvimento da primeira niveladora autopropelida (Figura 2.4). Porém, segundo Haddock (2007) a *Wehr Company of Milwaukee*, de *Wisconsin*, patenteou o

invento em 1921. Conforme Haddock (1998) o controle assistido da lâmina foi introduzido a partir de meados de 1920, inicialmente a maioria era controlada mecanicamente, mas alguns fabricantes como a *Galion* e *Huber* foram pioneiros em controles hidráulicos naquela época.

Figura 2.4: Niveladora autopropelida Russell operando em torno de 1919.



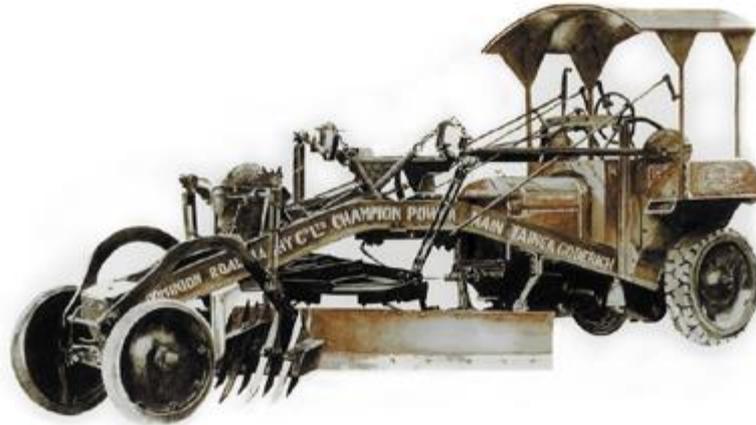
Fonte: COMMONS (2015).

Mesmo com a introdução das autopropelidas, as niveladoras rebocadas continuavam sendo fabricadas, utilizadas e melhoradas. Segundo Veloso (2013b), na década de 20, a *Austin-Western* produziu uma linha diversificada de máquinas rodoviárias, incluindo niveladoras rebocadas cujo peso variava entre 1.600 e 5.700 kg. Com uma lâmina de 3,62 m, o modelo N° 20 só poderia ser rebocado pelo maior trator disponível da época, o *Best Sixty*. A lâmina podia ser substituída por um escarificador, enquanto o eixo traseiro era telescópico.

Ainda em 1920, a *Champion* produziu um antecessor da motoniveladora articulada. Tratava-se, na verdade, de uma niveladora rebocada com um trator *Fordson* no lugar do eixo dianteiro. Os controles eram acionados por um operador posicionado na traseira da máquina. A *Austin-Western* também incorporou um trator *Fordson* numa máquina rebocada e, em 1928, a *Adams* lançou uma linha completa, com lâminas variando entre 2,10 e 3,60 m (VELOSO, 2013b). Desde então diversos comprimentos de lâmina passaram a ser fabricados e adquiridos pelos usuários conforme sua necessidade de produção.

Em 1928 a *Champion* desenvolveu um equipamento com as características um pouco mais próximas das que temos hoje, Figura 2.5. Volvo (2015) mostra que as niveladoras tornaram-se verdadeiramente motorizadas quando o trator foi deslocado para a parte de trás e embutido. O controle era fornecido por eixos e articulações operados por alavancas na cabine do operador. Outras características eram a cabine coberta e os pneus de borracha maciça.

Figura 2.5: Niveladora autopropelida *Champion* de 1928.



Fonte: VOLVO (2015).

Cada fabricante buscava inovar e apresentar modelos cada vez mais tecnológicos tanto para uma melhor produção e menor custo, como para maior durabilidade e trabalhabilidade do equipamento. Nos anos subsequentes e até a segunda metade do século XX, surgiram os mais diversos modelos de niveladoras autopropelidas, porém muitos foram descontinuados por não obterem o sucesso esperado, como o modelo da imagem abaixo.

Figura 2.6: Munktell C1 produzido entre 1938 e 1940.



Fonte: VOLVO (2015).

Em 1931, a primeira motoniveladora de pneus verdadeiramente de borracha, a "Auto Patrol", foi lançada, Figura 2.7. Ao contrário de modelos anteriores, esta foi uma

máquina de nivelamento dedicada - não uma estrutura de niveladora montada em um trator. Rebatizado de "Nº. 9 Auto Patrol" no final daquele ano, tornou-se o protótipo de todas as motoniveladoras de terraplenagem (NIUSR, 2015).

Figura 2.7: Nº. 9 Auto Patrol em Missoula, Montana.



Fonte: WAYMARKING (2014).

A partir da criação deste protótipo, fabricantes continuaram a buscar o aperfeiçoamento de seus equipamentos, tanto nos materiais utilizados na fabricação dos mesmos, quanto nas melhorias ergonômicas para o operador e na inserção de tecnologias para o aumento da produção. O fornecimento de equipamentos de portes maiores também passou a ser feito, o que atendeu as demandas de grandes rodovias e mineradoras.

A utilização de motor a diesel, pneus tandem, maiores potências e faixas de velocidades trabalháveis, partida elétrica, entre outros, são exemplos que podem ser citados das melhorias inseridas aos equipamentos nos anos seguintes. Porém, um dos mais relevantes implementos inseridos às motoniveladoras nos últimos anos foi o controle do equipamento através de *joysticks* (Figura 2.9), em substituição às antigas alavancas (Figura 2.8). A *Caterpillar* introduziu esta forma de controle a partir da Série M de suas motoniveladoras.

A substituição das 9 alavancas e do volante de direção por comandos *joysticks*, que modificam por completo o sistema de direção, tornam as máquinas bem fáceis de operar. O sistema de controle eletro-hidráulico operado por *joysticks* da Série M simplifica o controle do equipamento e reduz os movimentos de braços e mãos do operador em até 78%. O par de *joysticks* com três eixos foi desenvolvido para oferecer conforto e operação com baixo esforço, apresentando um padrão de controle lógico e intuitivo. O sistema ajuda o operador a manter altos níveis de eficiência durante todo o dia de trabalho. Por ser um sistema compacto

em relação às alavancas e ao comando de direção, o espaço no interior da cabine ficou mais amplo e confortável (EAEMÁQUINAS, 2010).

Figura 2.8: Interior da cabine de *Caterpillar 120K*, controle através de alavancas.



Fonte: PESA (2015a).

Figura 2.9: Interior da cabine da *Caterpillar 120M*, controle através de joysticks.



Fonte: PESA (2015b).

Uma das últimas tecnologias desenvolvidas para melhorar a produtividade do equipamento tem como foco a forma de operação, essa tecnologia é o controle automático da lâmina do equipamento, reduzindo assim a influência do fator humano na produção da máquina.

As tecnologias de controle de nivelamento controlam a lâmina automaticamente, permitindo que os operadores obtenham um nivelamento mais rapidamente e em menos passadas. A inclinação transversal usa sensores para calcular o posicionamento necessário de inclinação da lâmina para obter a inclinação transversal desejada da superfície (CATERPILLAR, 2011). Os tipos mais comuns de controle de greide são: a laser, sônico e 3D (GNSS ou Estação Total Robótica).

Soares (2011) em seu estudo com a tecnologia 3D, baseada em *Global Navigation Satellite System* - GNSS, diz que no método de terraplenagem tradicional é necessário a acurácia do operador, o auxílio de marcadores ou estacas e constantes medições de alturas do terreno por colaboradores fora da máquina para direcionamento da lâmina pelo operador, o que gera grande dispêndio de tempo e de dinheiro. Porém, com a disponibilização do GPS para uso civil em 1996, foi desenvolvida uma tecnologia que combina os dados fornecidos pelo mesmo e as máquinas pesadas, gerando assim uma nova forma de executar a terraplenagem. A utilização desta tecnologia anula as necessidades anteriormente citadas, que limitam a operação de máquinas na atividade de terraplenagem, gerando um grande aumento de produtividade e uma considerável economia de tempo em relação ao atual método empregado.

Em seu estudo, Soares (2011) confirmou que os pontos fortes citados pelos fabricantes da tecnologia são realmente verídicos, porém, salientou algumas considerações relevantes na utilização da mesma, como: parar a máquina por três a cinco dias, para instalação do sistema e calibração da mesma; o fato das máquinas necessitarem sempre estar com boa manutenção, não pode haver folgas; receio inicial ao desconhecido por parte dos operadores, porém com rápida adaptação e os cabos e peças que compõem a solução ainda serem difíceis de ser encontrados no país, por tal tecnologia ainda não ser tão difundida, o que leva os consumidores a terem que exportar tais produtos.

Como é possível perceber os fabricantes, desde o princípio, desenvolveram tecnologias e implementos na busca de aprimorarem o equipamento para facilitar o seu controle, aumentar a velocidade de operação e o desempenho, visando obterem uma maior produtividade e uma melhor qualidade nos serviços.

2.5. OPERAÇÕES DA MOTONIVELADORA NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA

A motoniveladora é um equipamento extremamente versátil devido tanto a sua precisão de movimentos, quanto as mais variadas posições que sua lâmina assume o que permite o trabalho em diversos ambientes. Segundo Ricardo e Catalani (2007) nenhuma

equipe de terraplenagem pode dispensar a presença de uma motoniveladora, pois ela pode desempenhar as mais variadas funções em todas as etapas do trabalho. Elas são utilizadas em acabamentos e conformação final de cotas do projeto da terraplenagem, corte, transporte e espalhamento nos trabalhos de raspagem, espalhamento e regularização das camadas a serem compactadas nos aterros, homogeneização de materiais no teor de umidade ótima, acabamento dos taludes dos cortes e das plataformas, conformando-as aos perfis longitudinais e transversais do projeto, manutenção dos caminhos de serviço, abertura de pequenas valetas de drenagem, escarificação leve de terrenos compactos e com teores de umidade muito baixos, limpeza da faixa e remoção da camada de terra vegetal quando não há raízes e tocos.

Chaves (1955) aponta os diversos serviços em que a motoniveladora pode operar, como raspagem, aplainamento ou acabamento de superfícies de terraplenagem, e ainda como unidades auxiliares na manutenção de pistas ou caminhos de serviço e no acabamento de superfícies e taludamento, além de serem utilizadas para acomodação ou espalhamento do material nos aterros de construção. Segundo o autor essas unidades tem largo emprego na manutenção e conservação de estradas e pistas de terra, as mais pesadas são indicadas para os trabalhos de reconstrução e conformação das superfícies das estradas e abertura ou limpeza de valetas e “sanjas” e se equipadas com lâminas adicionais podem realizar o serviço de valetamento, seu emprego é indispensável ainda nas atividades de mistura no local e em tratamentos betuminosos com a função de estabilização.

Para Pereira (1961), esses equipamentos são utilizados na construção e conservação e estradas, empregados na escavação de terra em raspagem, no acabamento da “chapa” de rodagem, na mistura e no espalhamento do material de revestimento ou pavimentação, no taludamento e no valetamento.

Guimarães (2001), também citou a importância do equipamento na manutenção de pistas ou caminhos de serviço, bem como nos serviços de acabamento de superfícies e entaludamentos nas obras de terraplenagem, já nas obras de pavimentação se aplicaria ao espalhamento de materiais para formar as camadas do pavimento e acabamento das superfícies de solos estabilizados. Além da realização de pequenas escavações, pequenos transportes de solos sobre o terreno, nivelamento e acabamento de superfícies. Se equipada com implementos como escarificador, *pusher* ou lâmina frontal pode realizar ainda outros tipos de serviços como, escarificação leve, empurrar unidades escavotransportadoras e empurrar materiais soltos, respectivamente.

O Manual de Custo Rodoviários (DNIT, 2003b) apresenta as funções do equipamento como manutenção dos caminhos de serviço, conformação dos taludes de corte,

abertura de valetas de drenagem superficial, espalhamento e regularização das camadas a serem compactadas nos aterros, ou das camadas constituintes do pavimento.

O Manual de Produção Caterpillar (CATERPILLAR, 2009) apresenta e descreve sua aplicação nos mais variados serviços, como: nivelamento de acabamento, laminação pesada, preparação de áreas para construção (corte, movimento e mistura de materiais), manutenção de rodovias, manutenção das vias de transporte, trabalho em taludes, construção e limpeza de valas, ripagem e escarificação e remoção de neve. Porém, a presente pesquisa irá se deter aos quatro serviços nos quais é possível calcular a produtividade do equipamento e que é englobado pelo sistema em desenvolvimento para seleção de motoniveladoras. Esses quatro serviços são de presença constante nas obras de terraplenagem no Brasil, e são os serviços realizados pelo equipamento motoniveladoras nas composições do SICRO, são eles:

- a) Conservação de caminhos: este serviço tem por objetivo manter a superfície plana para o tráfego de outros equipamentos utilizados na construção. Segundo o Manual de Produção Caterpillar (CATERPILLAR, 2009) “uma superfície que permita o tráfego seguro e eficiente das máquinas é o objetivo principal desta aplicação de motoniveladora. São desejadas elevações e rampas muito precisas, mas não são tão importantes quanto na laminação de acabamento”;
- b) Mistura de materiais: este serviço objetiva estabelecer o equilíbrio dos finos e das demais frações de agregados na composição da mistura do material. A motoniveladora revolve e reprocessa o material até que todas as leiras tenham sido misturadas e estejam na umidade adequada (BAESSO, 2003);
- c) Espalhamento: segundo Guimarães (2001), na execução dos serviços a terra é colocada em aterros, dessa forma é preciso espalhá-la uniformemente em camadas pouco espessas e também manter essa superfície razoavelmente nivelada, esse serviço até poderia ser realizado por tratores com lâmina obtendo maiores produções, porém sem perfeição no seu acabamento. Essa perfeição só é possível com a utilização de motoniveladoras. Baesso (2003) cita que nessa fase ocorre a redistribuição na pista de rolamento e, eventualmente, nas faixas laterais, do material que foi processado na fase de mistura. O espalhamento ocorre geralmente antes da fase de compactação, é por meio deste processo que as camadas são dispostas para posterior passagem do equipamento compactador.

- d) Acabamento de superfícies: Este serviço tem objetivo de preparar uma rodovia ou superfície da obra para futura pavimentação ou outra atividade de construção. A operação de acabamento é o serviço realizado pela motoniveladora que requer o maior grau de precisão (CATERPILLAR, 2009).

2.6. CÁLCULO DE PRODUÇÃO DA MOTONIVELADORA

Pereira (1961) apresenta uma equação para o rendimento da motoniveladora, expressando-o em tempo necessário para a realização da operação, utilizando para isso a Equação 2.1.

$$T = \sum \left(\frac{P \times dm}{V \times E} \right) \quad (2.1)$$

em que:

T : tempo [h];

P : número de passadas sobre a faixa para completar a operação;

dm : extensão percorrida em cada passada [km];

V : velocidade em cada passada [km/h];

E : fator de eficiência.

Diversos outros autores também utilizam o mesmo modelo para calcular o tempo de produção, pode-se citar entre eles Xie (1997), Guimarães (2001), Ricardo e Catalani (2007), Peurifoy *et al.* (2010), alguns deles fazendo as devidas alterações na fórmula para assim utilizar outras unidades ou mesmo outros sistemas de unidades. O modelo também aparece em normas e manuais em outros países, por exemplo, o Manual de Campo – Operações de movimentação de terra (DEPARTMENT OF THE ARMY, 2000) do Exército dos Estados Unidos.

Xie (1997) cita ainda que é possível se obter a produção do equipamento em m^2/min ou m^2/h (dependendo da unidade de tempo obtido – hora ou minuto), através da Equação 2.2.

$$EP = \frac{A}{T} \quad (2.2)$$

em que:

- EP*: produção esperada [m^2/min ou m^2/h];
A: área a ser trabalhada pela motoniveladora [m^2];
T: tempo [min ou h].

Para obter a produção em m^3/min ou m^3/h , é necessário saber o volume de material com o qual a motoniveladora irá trabalhar para isso a espessura da camada de trabalho é requerida, em posse do volume é possível utilizá-lo na Equação 2.3 para obter a produção.

$$EP = \frac{V}{T} \quad (2.3)$$

em que:

- EP*: produção esperada [m^3/min ou m^3/h];
V: Volume a ser trabalhado pela motoniveladora [m^3];
T: tempo [min ou h].

É muito importante compreender as equações acima, pois a partir das relações entre elas é que surgiram os mais variados modelos para o cálculo de produtividade de motoniveladoras, como os citados ainda por Guimarães (2001), Ricardo e Catalani (2007), Peurifoy *et al.* (2010) e os utilizados pelo sistema brasileiro para o cálculo de custos.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DO MODELO E VARIÁVEIS UTILIZADOS NO BRASIL

Neste capítulo é avaliado o modelo matemático utilizado para o cálculo de produtividade de motoniveladoras no sistema brasileiro e suas variáveis, de modo a identificar os dados necessários à realização do sistema, os campos de abrangência de cada variável e os pontos de melhoria, para se obter a maior precisão possível.

3.1. O CÁLCULO DE PRODUÇÃO E SELEÇÃO DE MOTONIVELADORAS NO SISTEMA BRASILEIRO

O Manual de Custos Rodoviários propõe composições de custos unitários de referência para as obras rodoviárias brasileiras, e essas composições são utilizadas no Sistema de Custos Rodoviários - SICRO. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT utiliza o SICRO como valor referencial tanto para insumos quanto para serviços a serem considerados nos orçamentos de obras licitadas (DNIT, 2014).

Essas composições propostas têm como um de seus princípios as equipes mecânicas (todos os equipamentos envolvidos na realização de um serviço), que deve estar em equilíbrio, ou seja, essas composições buscam selecionar seus componentes e dimensionar a quantidade de cada um deles, de tal forma que a harmonia do conjunto resulte numa produção otimizada. O equilíbrio se dá sempre em torno do equipamento eleito como principal ou que comandará o ritmo da patrulha, figurando os demais como seus coadjuvantes. Fazendo-se as relações entre a produção horária do equipamento principal e a dos demais, a quantidade destes será estabelecida como resultado destes quocientes, arredondados sempre a maior, para valores inteiros (DNIT, 2003a).

Um exemplo do que foi explicado acima é ilustrado na Tabela 3.1, com dados extraídos da composição do SICRO para a realização do serviço “Compactação de Aterros a 95 % Proctor Normal”, onde se pode ver que o equipamento principal é o compactador, e que sua produção máxima deve ser acompanhada pelos outros equipamentos, o que gera tempo improdutivo em equipamentos da patrulha que possuem uma produtividade maior do que o rolo compactador, para aquele serviço, nas condições adotadas.

Tabela 3.1: Dados de produção de equipe mecânica para serviços de compactação.

<i>Compactação de Aterros a 95 % Proctor Normal</i>	<i>Rolo Pé-de-Carneiro Auto Propelido Vib. 11,25 t 85 kW</i>	<i>Motoniveladora 93 kW</i>	<i>Grade de Discos 24 x 24</i>	<i>Trator de Pneus 82 kW</i>	<i>Caminhão Tanque 10.000L 135 kW</i>
Produção horária (m ³)	224	556	325	315	163
Número de unidades	1	1	1	1	2
Utilização operativa	1,00	0,41	0,69	0,72	0,69
Utilização improdutiva	0,00	0,59	0,31	0,31	0,31
Produção da equipe (m ³ /h)	224	224	224	224	224

Fonte: Dados extraídos de DNIT (2003b).

Segundo DNIT (2003b) a produção da motoniveladora, em m²/h, pode ser avaliada através da Equação 3.1.

$$P_1 = \frac{d \times m \times i \times 60}{n \times T} \quad (3.1)$$

Ou em m³/h por meio da Equação 3.2.

$$P_2 = \frac{d \times e \times m \times i \times 60}{n \times T} \quad (3.2)$$

em que:

- d*: distância percorrida pelo equipamento na operação de laminagem [m];
- e*: espessura da camada produzida, função da especificação de cada serviço [m];
- m*: largura útil da passada, e que depende do ângulo da lâmina utilizado para a operação [m];
- i*: fator de eficiência considerado;
- n*: número de passadas necessárias para executar o trabalho;
- T*: tempo do ciclo das operações necessárias à execução de uma passada [min].

Ainda conforme DNIT (2003b) na Tabela 3.2 são apresentados os diversos fatores e características da motoniveladora Caterpillar 120G, utilizada nas composições de preços, e que irão influir nas várias operações necessárias para a realização dos serviços. A Tabela 3.2, elaborada pelo Grupo de trabalho de Custos Rodoviários CROD-3 da Associação Brasileira

dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem – ABDER, utiliza dados de velocidades de percurso contidos no Manual de Produção da Caterpillar, para motoniveladoras, bem como, informações de entrevistas junto a operadores e demonstradores deste tipo de equipamento.

Tabela 3.2: Fatores e características da motoniveladora Caterpillar 120G.

Característica		Serviço			
		Regularização	Escarificação	Espalhamento (*)	Acabamento (*)
Velocidade (m/min)	Ida	115	85	130	90
	Volta		250		
Largura lâmina Útil (m)		0,97L - 0,20		0,61L - 0,20	0,97L - 0,20
Escarificador (m)			1,18		
N de passadas		6		4	4

(*) OBS: Serviço conjunto (média= 110 m/min) e 8 passadas
Tempo Fixo condicional = 0,25 min

Fonte: DNIT (2003b).

3.2. A MOTONIVELADORA NO SISTEMA BRASILEIRO

A motoniveladora só comanda a equipe em algumas atividades de pavimentação (DNIT, 2003b), conservação (DNIT, 2003c) e restauração (DNIT, 2003d). O cálculo realístico da produtividade do equipamento é muito importante em tais atividades, em que a motoniveladora dita a produção, já que é através do seu rendimento que as quantidades de outros equipamentos serão cotadas. Essa precisão nos cálculos também é de grande valia para os outros serviços em que a motoniveladora está na composição, pois mesmo não sendo o equipamento principal é necessário saber sua real produção e momento de utilização para que se possa obter seu melhor aproveitamento possível.

Na etapa de terraplenagem a motoniveladora está presente em 76,47% das composições, com a função de escarificação, manutenção de caminhos de serviço e áreas de trabalho, mas sua produtividade não chega a ser calculada. São citados valores de utilização produtiva e improdutiva do equipamento para cada equipe em função da distância de transporte, ou comprimento do caminho de serviço.

Dada a importância da acurácia no cálculo de produtividade para obtenção de um dimensionamento adequado, é apresentada uma análise da influência da variação das entradas no modelo de cálculo de modo a identificar pontos onde a adoção de valores padrões ou medianos como entrada o torna distante da realidade, limitando sua precisão.

3.3. O MODELO DE CÁLCULO DE PRODUÇÃO UTILIZADO NO BRASIL

Observe-se que as Equações 3.1 e 3.2 contidas no manual do sistema brasileiro (DNIT, 2003b) derivam das Equações 2.1, 2.2 e 2.3, com simples aplicações entre as mesmas, transformações de unidades e utilizações de princípios físicos como a velocidade sendo a relação entre o espaço e o tempo.

É possível observar ainda que, em parte das planilhas de cálculo das composições do SICRO, é utilizada a variável velocidade nas Equações 3.1 e 3.2 em substituição das variáveis d (distância) e T (tempo de ciclo), logo, as equações se apresentam nos formatos da Equação 3.3 ou 3.4.

Para a produção em m^2/h :

$$P_1 = \frac{i \times m \times v \times 60}{n} \quad (3.3)$$

E para a produção em m^3/h :

$$P_2 = \frac{e \times i \times m \times v \times 60}{n} \quad (3.4)$$

em que:

- e : espessura da camada produzida, função da especificação de cada serviço [m];
- i : fator de eficiência considerado;
- m : largura útil da passada, e que depende do ângulo da lâmina utilizado para a operação [m];
- v : velocidade média [m/min];
- n : número de passadas necessárias para executar o trabalho.

Guimarães (2001) também apresenta sua equação com os mesmos *inputs* da Equação 3.4, para o cálculo de produtividade do equipamento em aplicações como espalhamento de materiais soltos em terraplenagem ou serviços de pavimentação. Este será o modelo a ser utilizado como base para as avaliações da influência das variações das variáveis de entradas.

Para obter a produção em m^2/h a retirada da variável “espessura da camada” é necessária, podendo se manter a entrada “velocidade” ou substituí-la pelo correspondente,

quociente entre distância e tempo de ciclo. Como a espessura de camada já é padronizada nas especificações de serviço ela não será analisada nesta pesquisa, será utilizada a que é indicada na especificação do serviço estudado. Assim a avaliação de um dos dois modelos (m^3/h ou m^2/h) é suficiente, já que em ambos, as entradas que irão variar serão as mesmas.

O serviço escolhido para a análise foi o mesmo apresentado na Tabela 3.1, que é medido em m^3/h sendo assim utilizada a Equação 3.4 correspondente à planilha de cálculo do DNIT (pág 188, DNIT, 2003b), e conforme Guimarães (2001) está adequada para a situação, já que nesta composição a motoniveladora executa o serviço de espalhamento em camadas. Na Tabela 3.3 são apresentados os dados utilizados para a obtenção da produtividade da motoniveladora da equipe apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.3: Variáveis consideradas pelo SICRO para o cálculo de produtividade da motoniveladora em serviços de Compactação de Aterros a 95 % Proctor Normal.

<i>Variáveis</i>	<i>Valores</i>
<i>e</i>	0,2 m
<i>i</i>	0,83
<i>m</i>	3,35 m
<i>v</i>	100 m/min
<i>n</i>	6
Produção	556 m^3/h

Fonte: DNIT (2003b).

3.4. O MODELO DE MOTONIVELADORA UTILIZADO COMO PADRÃO

O modelo de motoniveladora utilizado como padrão para os cálculos nas composições do Manual de Custos Rodoviários é a motoniveladora Cat 120G. A Série G da Caterpillar foi lançada em 1972 e foi bem sucedida devido às suas características relativas à durabilidade, desempenho, entre outras. Em 1994 foi lançada a Série H do equipamento, que além de manter as já consagradas características, foram acrescentados melhoramentos incluindo melhor transferência de potência para o solo, melhor visibilidade, sistemas eletrônicos e hidráulicos avançados combinados com opções variáveis de força HP, distância entre eixos mais longa e um novo projeto de lâmina, entre outras, que permitiram à mesma

conseguir com uma passada o que levaria duas ou mais passadas com o modelo da Série G (PESA, 2014).

Em 2007 foi lançada a Série M, que manteve as qualidades das séries anteriores e em adicional apresentou melhorias na visibilidade, máxima produtividade, disponibilidade melhorada e menor tempo de manutenção, mas a mudança mais impactante dessa série foi a forma de controle do equipamento. A inserção de dois *joysticks* eletrohidráulicos reduziram os movimentos das mãos e dos pulsos em cerca de 78% comparado com os controles por alavancas convencionais para maior eficiência do operador (CATERPILLAR, 2009).

Apesar de muitos modelos de motoniveladora ainda utilizarem as tradicionais alavancas, algumas marcas estão aderindo aos *joysticks*, tanto pelos ganhos em produtividade como na ergonomia para o operador. Mesmo as máquinas de alavanca atualmente possuem uma alta produtividade e concorrem no mercado com esses modelos mais modernos; logo, é possível observar que os dados da Tabela 3.2, que ainda hoje são utilizados como base para os cálculos de produtividade nas composições do SICRO, e que foram obtidos a partir de operações com um modelo de equipamento do século passado, não têm mais a mesma representatividade de outrora.

3.5. A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NO CÁLCULO DA PRODUTIVIDADE

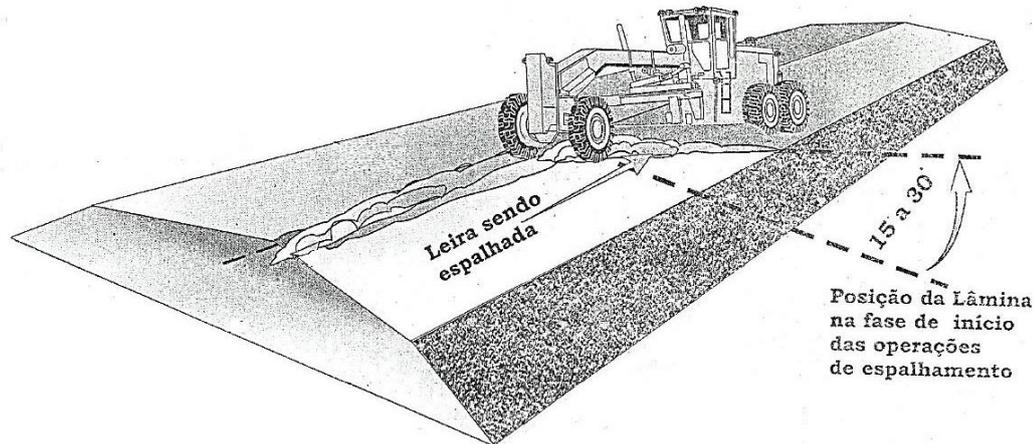
Para verificar o quanto cada variável (i , m , v e n) da equação 3.4 influencia no resultado final de produção do equipamento foi feita uma análise individual das mesmas. Primeiramente foi feita uma pesquisa na literatura e encontrados os valores que tais variáveis de entrada podem assumir nas operações que a motoniveladora executa no serviço em análise (Compactação de Aterros a 95 % Proctor Normal). Posteriormente, na execução do cálculo, para ser possível avaliar cada uma isoladamente manteve-se constante os valores das demais variáveis de entrada e variou-se apenas o da variável de entrada analisada, variação esta realizada conforme as faixas encontradas na literatura. Nos itens a seguir encontram-se descritas as análises de cada variável e os resultados encontrados.

3.5.1. Comprimento de lâmina

Nas operações com motoniveladoras utiliza-se a lâmina inclinada (Figura 3.1) para que o material possua uma movimentação adequada frente à mesma, e/ou depositando-se em forma de leiras na lateral da área de trabalho. Baesso (2003) explica que o operador da

máquina deve estar atento quanto ao posicionamento correto da lâmina no transcorrer da operação. Caso a lâmina se esvazie em tempo demasiadamente curto, ou ao contrário, encha demais, deverá mudar o seu ângulo longitudinal.

Figura 3.1: Angulação formada pela lâmina durante operações com motoniveladora.



Fonte: Baesso (2003), adaptado pelo autor.

O ângulo da lâmina no início da operação de espalhamento varia de 15 a 30 graus e posteriormente mantêm-se entre 30 e 40 graus. Para se encontrar a largura útil da lâmina utilizou-se dos princípios de razões trigonométricas da Equação 3.5.

$$m = \cos \alpha \times L \quad (3.5)$$

em que:

m : largura útil da lâmina [m];

α : ângulo formado pela lâmina [°];

L : largura real da lâmina [m].

As larguras reais de lâmina variam entre 3,658 m e 4,876 m (SOBRATEMA, 2012 e CATERPILLAR, 2009). Há motoniveladoras com lâminas maiores que 7 metros, porém essas de grande porte são mais utilizadas em operações de mineração. Baesso (2003) ainda afirma que os engenheiros de campo recomendam preferencialmente, uso de lâmina de 14 pés (4267 x 610 x 22 mm) uma vez que a mesma possibilita uma angulação maior de trabalho, movimentando volumes bem mais expressivos de materiais que as demais, 10 e 12 pés (3658 x 610 x 22 mm).

Nas planilhas do SICRO além de se utilizar apenas um modelo de motoniveladora (Cat 120G, que possui lâmina de 3,66m ou 12 pés), considera-se apenas uma angulação de forma que a largura útil da passada, efetivamente utilizada nos cálculos é 3,35m. Na Tabela 3.4 são apresentadas as produções do equipamento motoniveladora na operação de Compactação de Aterros a 95 % Proctor Normal (Tabela 3.2), os cálculos foram realizados com os mesmos dados utilizados no cálculo da planilha do SICRO (Tabela 3.3), porém alterando-se a largura útil de passada (variável m) conforme os tamanhos de lâminas disponíveis atualmente no mercado e os ângulos de trabalho utilizado durante este serviço (entre 15 e 30 graus no início da operação e entre 30 e 40 graus no decorrer da mesma), como citado anteriormente. Na planilha também constam a Média (μ) das produções obtidas com as variações de angulação e com as variações comprimento de lâmina para uma mesma angulação, o Desvio Padrão (S) e o Coeficiente de variação (CV) dos valores obtidos.

Tabela 3.4: Variação de comprimento e angulação de lâmina de motoniveladoras e as produções geradas.

Lâmina	Produção (m ³ /h)									
	Comprimento real (m)	Início da operação			Durante operação			μ	S	CV
		15°	20°	25°	30°	35°	40°			
3,66	586,54	570,61	550,34	525,87	497,41	465,16	532,66	45,82	9%	
3,71	594,88	578,72	558,16	533,35	504,48	471,78	540,23	46,48	9%	
3,81	610,91	594,32	573,20	547,73	518,08	484,49	554,79	47,73	9%	
3,96	634,96	617,72	595,77	569,29	538,48	503,57	576,63	49,61	9%	
4,27	684,19	665,60	641,96	613,42	580,22	542,61	621,33	53,45	9%	
4,29	687,39	668,72	644,97	616,30	582,94	545,15	624,25	53,70	9%	
4,32	692,68	673,87	649,93	621,04	587,43	549,35	629,05	54,12	9%	
4,57	733,09	713,18	687,84	657,27	621,70	581,39	665,75	57,27	9%	
4,88	781,84	760,60	733,58	700,97	663,03	620,05	710,01	61,08	9%	
μ	667,39	649,26	626,19	598,36	565,98	529,28	606,08			
S	65,93	64,14	61,86	59,11	55,91	52,29	59,87			
CV	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%			

Fonte: Autor.

É possível perceber que tanto a largura real da lâmina quanto a variação de sua angulação produzem alterações nos resultados finais de produção. Logo, a utilização de um equipamento com determinado tamanho de lâmina como padrão para os cálculos, não atende a abrangência de produções que podem ser obtidas com os equipamentos disponíveis hoje e um valor médio de angulação não é representativo da realidade que possa ser encontrada em campo.

A possibilidade de se inserir comprimentos de lâmina no cálculo ou a sugestão pelo próprio sistema do que atender melhor a produtividade requerida deve ser considerada como melhoria para obtenção de valores de produção mais reais, além de ser realizada uma ponderação com as angulações de lâmina já que as mesmas também influenciam bastante no resultado final.

3.5.2. Velocidade média

A velocidade de operação do equipamento é uma das variáveis que influenciam na produtividade do mesmo, Pereira (1961) mencionou que a velocidade em cada passada pode ser igual, mas, em regra, à medida que o trabalho progride podem as novas condições exigir aumento ou diminuição de velocidade.

Peurifoy *et al.* (2010) também afirma que a velocidade pode variar para mais ou para menos conforme o andamento do trabalho, mas acrescenta que a mesma depende da habilidade do operador e do tipo de material. Guimarães (2001) sugere faixas de velocidade para alguns serviços como Conservação de caminhos (05 - 16 km/h), Espalhamento de materiais (05 - 10 km/h), Mistura de materiais (08 - 25 km/h) e Acabamento de superfícies (05 - 08 km/h).

Para o serviço em análise a faixa de velocidade sugerida é entre 05 - 10 km/h, na Tabela 3.5 se encontram as produções obtidas para cada velocidade, dentro da citada faixa, mantendo-se, para as outras variáveis, os valores da Tabela 3.3.

Observando-se a Tabela 3.5 é possível verificar que a variação entre a menor e a maior velocidade da faixa em estudo foi de apenas 5 km/h, o que resultou em um aumento de produção 100% entre as mesmas, pois a velocidade foi dobrada. É importante observar que há serviços em que a faixa de velocidade sugerida difere entre seus extremos em até 17 km/h, sendo assim a representatividade do cálculo ao se utilizar uma velocidade média passa a ser baixíssima, pois seu coeficiente de variação é muito alto.

Tabela 3.5: Variação de velocidade de operação de motoniveladoras e as produções geradas.

Velocidade		Produção
km/h	m/min	m ³ /h
5	83,33	463,42
6	100,00	556,10
7	116,67	648,78
8	133,33	741,47
9	150,00	834,15
10	166,67	926,83
μ		695,12
S		173,39
CV		25%

Fonte: Autor.

Logo, tanto a classificação de níveis de operadores conforme sua experiência para as definições de faixas de velocidade de trabalho, como na equação haver ponderação das velocidades passíveis de serem exercidas em cada serviço (já que as mesmas variam no decorrer do trabalho), e seus períodos, são necessários para a precisão nos resultados.

3.5.3. Número de passadas

Conforme Pereira (1961) e Guimarães (2001), o número de passadas é quantas vezes a motoniveladora terá de passar sobre a faixa para completar a operação, sendo que o rendimento do equipamento está na razão direta do número de passadas efetuadas, logo o número de passadas deve ser o necessário para a execução da tarefa. Ainda segundo os autores a quantidade de passadas depende da natureza do solo e da largura da faixa.

Pereira (1961), Guimarães (2001) e Peurifoy *et al.* (2010) citam ainda que a quantidade deve ser avaliada previamente, tendo em vista experiências anteriores em trabalhos realizados. As planilhas do SICRO seguem a recomendação dos autores em avaliar previamente a quantidade de passadas, pois as mesmas se baseiam na Tabela 3.2 desenvolvida para este fim. Porém, como já citado anteriormente os equipamentos utilizados na atualidade sofreram melhorias que afetaram no desempenho dos mesmos, diminuindo assim o número de passadas necessárias para a execução dos serviços (PESA, 2014).

Para o serviço em análise o número de passadas sugerido em estudo com equipamento antigo (CAT 120G - equipamento de referência do DNIT) foi de 6 passadas, na Tabela 3.6 são apresentadas as produções obtidas para cada quantidade de passadas variando de 3 a 6, já que equipamentos atuais chegam a otimizar as passadas em 100%, e mantiveram-se, para as outras variáveis, os valores da Tabela 3.3.

Tabela 3.6: Variação de número de passadas em operações de motoniveladoras e as produções geradas.

Número de Passadas	Produção (m ³ /h)
3	1112,20
4	834,15
5	667,32
6	556,10
μ	792,44
S	241,87
CV	31%

Fonte: Autor.

Pode-se constatar que esta é uma das variáveis que mais influenciam nos resultados finais de produção, já que ela se relaciona com a mesma de forma racional. A diferença de uma única passada na estimativa já altera consideravelmente o resultado da produção.

3.5.4. Fator de eficiência

O fator de eficiência exprime, conforme Ricardo e Catalani (2007), a relação entre o número de horas efetivamente trabalhadas e o número de horas que o equipamento fica à disposição da obra para a execução de uma tarefa, ou seja, o turno de trabalho admitido. O equipamento pode executar certo número de ciclos, durante algumas horas, sem que haja paradas. Entretanto, com o decorrer do tempo, haverá forçosamente o aparecimento de paradas das mais diversas causas (defeitos mecânicos, más condições meteorológicas ou de solo, falta de habilidade do operador e etc.), de maneira que, na realidade e desde que o número de horas de observação seja grande teremos sempre $i < 1$.

Pereira (1961) e Peurifoy *et al.* (2010) sugerem a utilização de 0,60 como fator de eficiência para o cálculo de produção de motoniveladoras. Já Guimarães (2001) sugere utilizar entre 0,70 e 0,75. As planilhas do Manual de Custos Rodoviários, não consideram os fatores climáticos e adotam como fator de eficiência para serviços de Terraplenagem e Pavimentação o valor de 0,83 (hora operativa de 50 minutos), para serviços de Conservação utilizam 0,67 (hora operativa de 40 minutos), considerada a influência do tráfego existente, e para serviços de Restauração 0,75 (hora operativa de 45 minutos) considerando também a influência do tráfego existente na execução dos serviços.

As produções adotadas pelo SICRO, como dito acima, não contemplam a ocorrência de condições climáticas desfavoráveis, as quais influenciam, em função da frequência e intensidade, de modo específico, cada tipo de serviço. Na elaboração do Orçamento de um Projeto Final de Engenharia, há necessidade de, em função dos dias de chuva previstos dentro do prazo total desejado para a execução dos serviços, serem computadas as horas improdutivas calculadas (DNIT, 2003b).

Para o serviço em análise o fator de eficiência considerado era de 0,83, na Tabela 3.7 são apresentadas as produções obtidas para cada valor de fator de eficiência para motoniveladoras, encontrados na literatura, mantendo-se, para as outras variáveis, os valores da Tabela 3.3.

Tabela 3.7: Variação do fator de eficiência em operações de motoniveladoras e as produções geradas.

Fator de eficiência	Produção (m ³ /h)
0,60	402,00
0,65	435,50
0,70	469,00
0,75	502,50
0,80	536,00
0,85	569,50
μ	485,75
S	62,67
CV	13%

Fonte: Autor.

O fator de eficiência é o parâmetro, entre os analisados, que melhor está representando a realidade nas planilhas do sistema, já que o mesmo considera a questão da movimentação nas proximidades da área de trabalho e alerta ao responsável a necessidade de considerar os dias chuvosos na inclusão dessa variável nos cálculos, limitando assim a abrangência de possibilidade de valores a um número mais representativo da realidade.

3.6. CONCLUSÕES DA ANÁLISE DO MODELO E SUAS VARIÁVEIS

Os modelos matemáticos estão de acordo com a literatura, porém, as variáveis adotadas nos cálculos da planilha em análise do SICRO, tornam o resultado obtido pouco representativo da realidade. A abrangência de possibilidades de produção que cada variável engloba, faz com que seja necessária uma maior precisão no fornecimento de cada variável de entrada, para que desta forma o resultado final do cálculo de produção também seja mais preciso.

As ações que devem ser tomadas para se obter resultados mais precisos de produção são:

- Não se deve limitar o sistema a um único equipamento, desde que atualmente existem vários tamanhos de lâminas e por ser a única variável que envolve diretamente uma característica do equipamento, devem ser considerados outros valores, para tornar o cálculo mais próximo do real caso sejam utilizados outros modelos do equipamento em campo. O sistema deve permitir entrada dessa informação, ou armazenar no banco de dados tais informações para calcular todas as possibilidades de forma a fornecer o melhor cenário para atender a produção requerida.
- Realizar análise de tempos nos quais os operadores utilizam cada angulação de lâmina para a realização dos serviços, dessa forma será possível fazer ponderações dentro do cálculo e obter resultados mais representativos.
- Classificar os níveis de operadores conforme sua experiência e avaliar as faixas de velocidades com as quais os mesmos trabalham, sendo possível assim entrar no sistema com a informação do nível do operador e limitar a velocidade utilizada no cálculo (reduzindo a abrangência de velocidade para cada serviço), e/ou da mesma forma que com a angulação, analisar tempos em que se permanece em cada velocidade para se possível ponderá-las na equação.

- Executar avaliação de número de passadas necessárias para cada serviço com os equipamentos atuais e conforme nível do operador.

A realização da avaliação de equipamentos, tempo, operadores, execução, entre outros, para a obtenção das variáveis como sugeridas acima, não é de fácil execução, pois demanda equipamentos, pessoas e um trecho dedicado somente à análise, devido às repetições necessárias ao estudo, com as alterações das variáveis. Porém, é aconselhável que essa avaliação seja realizada não somente com a motoniveladora, mas com todos os equipamentos envolvidos em construções rodoviárias, conforme as variáveis que influenciam a produção de cada um. Desta forma, será possível ter maior controle sobre a produção dos mesmos e dimensioná-los adequadamente para cada serviço.

CAPÍTULO 4

O SISTEMA DE SELEÇÃO DE MOTONIVELADORAS

Neste capítulo é apresentado o Sistema de Seleção de Motoniveladoras desenvolvido, e detalhado o seu funcionamento. É apresentado desde o modelo matemático utilizado e suas variáveis até o banco de dados, de onde as informações do equipamento são coletadas. Ainda neste capítulo é feito o teste de validação.

4.1. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema desenvolvido nesta pesquisa levou em consideração as análises apresentadas no capítulo anterior e incorporou algumas das melhorias identificadas, como: considera diversos tipos de motoniveladoras, considera as médias das faixas de velocidade e angulação sugeridas pela literatura conforme o tipo de serviço, e fatores de eficiência diferenciados pelo tipo de obra, além do número de passadas, diferenciados conforme o tipo de serviço e modelo de equipamento.

O *software* final desenvolvido para apoio a decisão em seleção de motoniveladoras foi denominado SADPATROL – Sistema de Apoio à Decisão de Motoniveladoras / Patrol, e sua utilização se dá por meio de um navegador na internet. Pode ser acessado através de computadores e *smartphones*, tendo como requisito mínimo apenas a conexão com a internet. O endereço para acesso ao sistema é: www.sadpatrol.com.br.

O *software* possui cadastrado em seu banco de dados 46 tipos de motoniveladoras, dos mais variados modelos e tamanhos, de 12 fabricantes distintos. É possibilitado ao usuário calcular a frota com equipamentos próprios e verificar se atende ao prazo da obra, caso o prazo não seja atendido pela frota própria ou o usuário não possua equipamentos, o sistema executa as informações da obra para todos os equipamentos do banco de dados e fornece a solução com as 46 opções organizadas em frotas, em ordem crescente, de número de equipamento.

É possibilitado ainda selecionar os equipamentos nos quais se possui informação de custo horário, para assim obter a frota de menor custo. Toda a multiplicidade de informações necessárias à seleção de motoniveladoras, e suas inter-relações e dependências, foram organizadas de forma sistêmica no *software* SADPATROL, diminuindo assim o empirismo e a dependência da experiência humana na seleção de frotas.

4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO E SUAS VARIÁVEIS

4.2.1. Modelo matemático

O modelo matemático empregado no sistema é o mesmo utilizado nas composições do SICRO, e que foi avaliado no Capítulo 3. Conforme o tipo de serviço a produção pode ser dada em m^2/h ou m^3/h , sendo que para a primeira não se utiliza a variável espessura de camada conforme apresentado nas Equações 3.3 e 3.4.

Para os serviços de Acabamento de Superfícies e Conservação de Caminhos o cálculo de produção se dá através da Equação 3.3 e dessa forma sua produção resulta em m^2/h , já para os serviços Espalhamento de Materiais e Mistura de Materiais o cálculo de produção se dá através da Equação 3.4 e dessa forma sua produção resulta em m^3/h .

Ao selecionar o tipo de serviço no qual se deseja calcular a produtividade do equipamento, o sistema associa a qual equação que deverá ser utilizada no cálculo e organiza os campos de inserção de informação de acordo com as variáveis que a equação solicita, ou seja, se a equação for a que resulta em m^2/h não aparecerá campos que solicitem espessura.

4.2.2 Equipamentos considerados e banco de dados

Como apresentado no tópico 4.1 uma das melhorias adotadas para aumentar a precisão do sistema foi considerar diversos tipos de equipamentos, de marcas variadas e com tamanhos de lâminas diferentes disponíveis atualmente no país, esses dados são obtidos a partir de um banco de dados desenvolvido para este fim.

Os dados das motoniveladoras da fabricante *Caterpillar* foram retirados do Manual de Produção 39 (CATERPILLAR, 2009), porém esse manual não possui os dados das motoniveladoras da Série G, os mesmo foram obtidos em um *site* sobre equipamentos (RITCHIESPECS, 2015), e os dados da motoniveladora 120G foram retirados do Manual de Custos Rodoviários (DNIT, 2003b). Já os dados das motoniveladoras das demais fabricantes foram retirados do Guia Sobratema de Equipamentos 2012-2014 (SOBRATEMA, 2012).

Ao todo, o sistema considera 46 tipos de motoniveladoras, dos mais variados modelos e tamanhos, de 12 fabricantes distintos. Todos esses equipamentos possuem seus dados cadastrados no banco de dados do sistema.

4.2.3 Variáveis utilizadas no cálculo

4.2.3.1 Angulação de lâmina, Velocidade de execução de serviços e Espessura.

Após pesquisa sobre execução dos serviços realizados pela motoniveladora verificou-se que para cada tipo de serviço a angulação de lâmina, a velocidade de execução e a espessura trabalhável variam, então foram estabelecidos valores médios para estas variáveis conforme o tipo de serviço, para ser utilizado como *default* pelo sistema, caso o usuário não possua tais dados.

O ideal seria ponderar dentro de cada serviço, o quanto o operador permanece em cada angulação; porém, para tanto é necessário um estudo com medições em campo além das definições dos níveis de experiência dos operadores. No sistema utilizou-se a média das faixas de angulação por serviço, mesmo sem haver ponderação a precisão do cálculo é melhorada já que é utilizado um valor mais adequado, valores esse obtidos de Baesso (2003), e não apenas um único valor para todo tipo de serviço, como é feito nas planilhas do SICRO.

Outra variável que depende do tipo do serviço é a velocidade, que se assemelha ao caso da angulação, pois para realizar a ponderação seria necessário uma avaliação de campo e definições dos níveis de experiência dos operadores. Guimarães (2001) cita faixas de velocidades para cada tipo de serviço, o sistema utiliza a média dessas faixas. Dessa forma quando o usuário selecionar o tipo de serviço o qual deseja calcular a produtividade de uma motoniveladora, a velocidade, espessura e a angulação com que o equipamento trabalha já será definida e juntamente com a informação do modelo do equipamento utilizado o sistema calcula a largura útil da lâmina. Se o usuário preferir utilizar dados aferidos em campos ele pode simplesmente apagar os valores “padrões” e digitar os seus, em seguida calcular. A seguir estão descritas as variáveis utilizadas por cada tipo de serviço

- Conservação de caminhos

A motoniveladora é geralmente o equipamento mais utilizado para este tipo de serviço, pois a conservação necessita basicamente de leves cortes e aterros, assemelhando-se a operação denominada patrolagem. Baesso (2003) afirma que operação de Patrolagem da Plataforma tem por objetivo melhorar as condições de superfície de rolamento restringindo-se a correções de pequenas irregularidades e prover o abaulamento necessário, o autor cita ainda, recomendações de execução deste serviço, como angulação de lâmina e espessura. Tais

recomendações serão assumidas no sistema desenvolvido devido a operação de Conservação dos Caminhos de Serviços ser semelhante à operação de Patroagem.

A operação é realizada em duas fases, na fase inicial a motoniveladora opera em velocidades na faixa de 3 a 5 km/h, com sua lâmina variando de 30 a 45°, regularizando a superfície por meio de um leve arraste dos materiais, sentido borda-eixo, desta forma eliminando as irregularidades da pista. Este procedimento formará duas leiras de materiais, as quais estarão situadas lado a lado nas proximidades do eixo da pista, na segunda e última etapa, trabalho da motoniveladora será o espalhamento das citadas leiras, com a lâmina inicialmente posicionada com angulação entre 30 e 40° no sentido eixo-bordo. Conforme o equipamento se movimenta à frente e a lâmina se enche de material, o operador diminui o ângulo e eleva a lâmina, progressivamente fazendo com que o espalhamento se realize uniformemente pela superfície (BAESSO, 2003). Nas duas fases a faixa de angulação em comum está entre 30 e 40°, logo no sistema será utilizada a angulação média desta faixa para este tipo de serviço como padrão. Caso o usuário verifique em campo que a angulação de seu equipamento na execução da conservação de caminhos seja diferente da sugerida pelo sistema, ele pode alterar e colocar a angulação aferida.

Guimarães (2001) aconselha faixas de velocidades para diversos tipos de operações de motoniveladoras, para conservação de caminhos a velocidade indicada pelo autor é entre 5 e 16 km/h. A média desta faixa de velocidade também será considerada como padrão pelo sistema, podendo o usuário alterá-la, caso possua dados de campo.

- Espalhamento de materiais

Em aplicações como espalhamento de materiais a produção de motoniveladoras poderá ser caracterizada pelo volume de material espalhado por unidade de tempo (Guimarães, 2001). Isso ocorre devido o serviço de espalhamento ser realizado em camadas, pouco espessas.

No Manual de Custo Rodoviários (DNIT, 2003b), a espessura utilizada na execução dos serviços com motoniveladoras, exceto em bota-fora, é de 0,20 metros. Baesso (2003) também afirma que são aconselháveis espessuras normais em torno de 0,20 metros para garantir a homogeneidade da camada. Logo, o sistema utilizará o valor e 0,20 metros como padrão para espessura trabalhável pelas motoniveladoras, sendo possível a alteração pelo usuário, caso necessário.

Baesso (2003) sugere que nesta operação a angulação da lâmina deve ficar na faixa de 10 a 20°, logo no sistema será utilizada a média desses valores, para este tipo de serviço. E a faixa de velocidade sugerida por Guimarães (2001) para espalhamento de materiais é de 5 a 10 km/h, e o valor que será utilizado como *default* no sistema é a média dessa faixa.

- Mistura de materiais

O material é depositado no trecho e misturado em partes, da mesma forma que em espalhamento de materiais adotou-se camadas de 0,20 m para garantir homogeneidade, no serviço de mistura o sistema também adotará essa espessura, pois é sabido que dessa forma se obtém uma boa trabalhabilidade.

Baesso (2003) ilustra essa operação com a lâmina do equipamento em angulação na faixa de 30 a 40°, o sistema adotará o valor médio dessa faixa como padrão. E a faixa de velocidade sugerida por Guimarães (2001) para mistura de materiais é de 8 a 25 km/h, a média dessa faixa será a velocidade utilizada pelo sistema como padrão para este tipo de serviço.

- Acabamento da superfície

Essa etapa é semelhante à patrolagem ou à conservação de caminhos, pois haverá uma fina regularização da superfície, para obter o greide necessário com precisão. O Manual de Produção Caterpillar (CATERPILLAR, 2009), inclusive compara o serviço de manutenção de caminhos com o de acabamento de superfície, apontando que no primeiro deseja-se elevações e rampas muito precisas, porém não tanto quanto no segundo, afirma ainda que o segundo é a operação de motoniveladora que mais requer precisão, logo sua execução deve ser feita em velocidades baixas. Por ser semelhante à primeira, o sistema adotará a angulação *default* da mesma, porém, a velocidade de execução será mais baixa conforme orientado acima e seguindo as recomendações de Guimarães (2001), que aponta a faixa de velocidade para acabamento de superfície sendo entre 5 e 8 km/h, na qual o sistema adotará a média como *default*.

A Tabela 4.1 é um resumo das variáveis: velocidade, angulação de lâmina e espessura, adotadas pelo sistema.

Tabela 4.1: Faixas de velocidade, espessura e angulação e valores médios adotados no sistema, conforme tipo de serviço.

<i>Tipo de serviço</i>	<i>Faixa de Velocidade (Guimarães, 2001)</i>	<i>Velocidade Média (km/h)</i>	<i>Faixa de angulação da lâmina (Baesso, 2003)</i>	<i>Ângulação média (graus)</i>	<i>Espessura (metros)</i>
Conservação de caminhos	05 - 16 km/h	10,5	30 a 40 graus	35	-
Espalhamento de materiais	05 - 10 km/h	7,5	10 a 20 graus	15	0,20
Mistura de materiais	08 - 25 km/h	16,5	30 a 40 graus	35	0,20
Acabamento de superfícies	05 - 08 km/h	6,5	30 a 40 graus	35	-

Fonte: GUIMARÃES (2001) e BAESSO (2003), adaptado pelo autor.

4.2.3.2 Número de passadas

Com relação ao número de passadas é extremamente aconselhável que o usuário realize um teste com o equipamento que quer utilizar para encontrar o número de passadas necessárias em cada serviço, autores como Pereira (1961), Guimarães (2001) e Peurifoy *et al.* (2010) já alertavam para isso. O sistema realiza essa recomendação e solicita o número de passadas, mas caso o usuário não esteja em posse do valor é possível utilizar o número de passadas baseado no estudo do SICRO. Na Tabela 3.2 é apresentado o número de passadas necessário para os serviços de Regularização (6), Espalhamento (4) e Acabamento (4), obtidos pelo DNIT em estudo prévio com o equipamento Motoniveladora Caterpillar 120G.

Avaliando as planilhas do SICRO também podemos obter o número de passadas necessárias ao serviço de mistura já que comparando um mesmo serviço realizado sem mistura e com mistura o aumento da quantidade de passadas é da ordem de 4. Dessa forma, pode-se concluir que o serviço de mistura necessita de 4 passadas do equipamento para ser realizado (DNIT, 2003b). Logo, serão considerados os números de passadas citados acima para cada serviço com equipamentos antigos (Série G) e será feita uma otimização de 100% (3 passadas para regularização e 2 passadas para espalhamento, acabamento ou mistura) para equipamentos mais atuais, já que como foi exposto no Capítulo 3, os equipamentos com as tecnologias recentes reduzem o número de passes, e mesmo essa afirmação sendo do fabricante Caterpillar essa otimização será considerada também para os equipamentos de outros fabricantes, já que são concorrentes e para o serem necessitam apresentar uma

produção equivalente. Caso o usuário utilize a opção de passadas estimadas o sistema emite um aviso de que a produção calculada não é representativa, sendo apenas uma aproximação.

4.2.3.3 Fator de eficiência

O Fator de eficiência foi avaliado no capítulo anterior como a variável melhor representada com os valores utilizados no SICRO, por levar em consideração a influência do tráfego existente quando a obra for de conservação ou restauração e alertar ao usuário sobre a pluviometria não estar sendo considerada.

O sistema também não considera os fatores climáticos e adota os valores conforme os manuais do DNIT: para obras de Terraplenagem e Pavimentação o valor de 0,83 (hora operativa de 50 minutos), para Conservação utiliza 0,67 (hora operativa de 40 minutos), e para Restauração 0,75 (hora operativa de 45 minutos).

4.3. CÁLCULO DE VERIFICAÇÃO DO PRAZO DE EXECUÇÃO E DO NÚMERO DE EQUIPAMENTO QUE ATENDE AO PRAZO

Ao se obter o valor da produtividade do equipamento é possível utilizar esse dado em conjunto com informações da obra (extensão, prazo, turno de trabalho, etc), e encontrar o número de unidades necessárias à realização do serviço no prazo estipulado, ou caso o usuário já possua frota própria é possível verificar se tal frota atende os requisitos da obra ou se será necessário locar/adquirir outros equipamentos. O primeiro caso é o caso de dimensionamento e o segundo é o de verificação. Os cálculos no SADPATROL para obtenção do dimensionamento ou verificação foram baseados no exposto por Ricardo e Catalani (2007).

No caso do dimensionamento primeiramente é necessário saber a produção média diária (Q_m) requerida para que a obra seja realizada dentro do prazo, isso é possível através de dados de projeto aplicados na Equação 4.1.

$$Q_m = \frac{V}{P} \quad (4.1)$$

em que:

Q_m : produção média diária [m^3 /dia];

V : volume a ser trabalhado [m^3];

P : prazo, em dias corridos [dia].

Com os dados de produção estimada do equipamento e informações do turno de trabalho isso é possível calcular a produção diária do equipamento através Equação 4.2

$$Q_d = Q \times t \quad (4.2)$$

em que:

Q_d : produção diária do equipamento [m^3 /dia];

Q : produção horária do equipamento [m^3 /h];

t : turno de trabalho diário [h].

Sendo assim, o número mínimo de equipamentos para a execução do serviço dentro do prazo estabelecido é dado pela Equação 4.3.

$$n = \frac{Q_m}{Q_d} \quad (4.3)$$

em que:

n : número mínimo de equipamentos;

Q_m : produção média diária [m^3 /dia];

Q_d : produção diária do equipamento [m^3 /dia].

No caso de verificação se a frota atende o prazo, a Equação 4.4 é utilizada para calcular a produção diária da equipe/frota.

$$Q_d = n \times Q \times t \quad (4.4)$$

em que:

Q_d : produção diária da equipe [m^3 /dia];

n : número mínimo de equipamentos;

Q : produção horária do equipamento [m^3 /h];

t : turno de trabalho diário [h].

Sendo assim, o prazo será determinado pela Equação 4.5.

$$P = \frac{V}{Q_d} \quad (4.5)$$

em que:

P : prazo, em dias corridos [dia];

V : volume a ser trabalhado [m^3];

Q_d : produção diária do equipamento [m^3 /dia].

4.4. CÁLCULO DE VOLUME SOLTO PARA OPERAÇÕES DE ESPALHAMENTO E MISTURA DE MATERIAIS

O sistema solicita informações da obra como extensão, largura da plataforma e espessura da camada para encontrar o Volume a ser trabalhado pelo equipamento, porém ao inserir essa espessura da camada da plataforma o volume encontrado é o da camada final, já compactada, assim é preciso encontrar o volume do material solto já que a motoniveladora trabalha com o material em estado solto. Para isso se utiliza os princípios citados por Senço (2001), onde para se encontrar a espessura solta da mistura de dois materiais A e B utilizam-se as Equações 4.6 e 4.7.

$$e_{AS} = \left(\frac{X}{100}\right) \times \left(\frac{\gamma_C}{\gamma_{AS}}\right) \times e_C \quad (4.6)$$

em que:

e_{AS} : espessura solta do material A [cm];

X : porcentagem do material A na mistura [%];

γ_C : massa específica aparente da mistura compactada [g/cm^3];

γ_{AS} : massa específica aparente do material A solto [g/cm^3];

e_C : espessura compactada [cm];

$$e_{BS} = \left(\frac{Y}{100}\right) \times \left(\frac{\gamma_C}{\gamma_{BS}}\right) \times e_C \quad (4.7)$$

em que:

e_{BS} : espessura solta do material B [cm];

Y : porcentagem do material B na mistura [%];

γ_C : massa específica aparente da mistura compactada [g/cm^3];

γ_{BS} : massa específica aparente do material B solto [g/cm^3];

e_C : espessura compactada [cm];

Assim é possível encontrar as espessuras dos materiais soltos, e de posse da extensão e largura da plataforma encontrar o volume solto o qual o equipamento motoniveladora trabalhará. Para misturas com mais materiais se utilizam as mesmas equações acima, porém com os devidos dados do material em análise e observando que a proporção $X + Y + Z...$ tem que resultar em 100%. Já para um único material se utiliza a mesma equação acima admitindo a proporção como 100%, pois a camada será composta por um único material, ou seja, 100% de determinado material.

No sistema, o usuário ao escolher o tipo de serviço Espalhamento de materiais ou Mistura de materiais, poderá calcular o volume o qual a motoniveladora precisará espalhar ou misturar, para isso precisará inserir as seguintes informações em seus devidos campos: Extensão, Largura da plataforma, Espessura da camada compactada e Massa específica aparente da mistura compactada, além das informações do material que comporá a camada. No campo *Materiais* há uma coluna para inserção da proporção em que esse material se encontra na camada e outra para a inserção da massa específica aparente solta do mesmo, ao usuário introduzir as informações, o sistema já calcula a espessura solta do material e apresenta o resultado na última coluna. Ao lado, encontrar-se um botão “+” onde é possível adicionar mais materiais caso a camada seja composta por uma mistura, neste caso é apresentados na última coluna a espessura solta de cada material e ao fim da mesma a soma dessas espessuras. Em posse dessas informações o sistema calcula o Volume solto o qual o equipamento trabalhará.

4.5. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Foram utilizados no desenvolvimento do sistema a linguagem de programação PHP com o *Zend Framework* e o banco de dados MySQL.

O PHP (*Hypertext Preprocessor*) é uma linguagem de programação de vasta utilização, principalmente em desenvolvimento para a Web e pode ser mesclada dentro do código HTML. A sintaxe da linguagem lembra C, Java e Perl, e é de fácil aprendizagem. Tem por objetivo principal possibilitar desenvolvedores escreverem páginas que serão geradas de forma dinâmica e rápida (PHP, 2015). A linguagem pode ser usada na maioria dos sistemas operacionais, não precisa de licença e é suportada por grande parte dos servidores *WEB* atuais, dessa forma sendo uma das linguagens mais utilizadas na internet para desenvolvimento *web*. A versão utilizada para o desenvolvimento do sistema da presente pesquisa foi a PHP 5.4.

O *Zend Framework* tem como objetivo simplificar o desenvolvimento web, é baseado em PHP, é orientado a objetos, usa o padrão de projeto MVC, possui contribuidores de *software* livre. Facilita a programação de um modo geral, instituindo o padrão MVC, mas também para ações específicas, como acessar bancos de dados ou saída para um arquivo PDF (IBM, 2015). A versão utilizada no sistema desenvolvido nesta pesquisa foi a ZF 1.12.11.

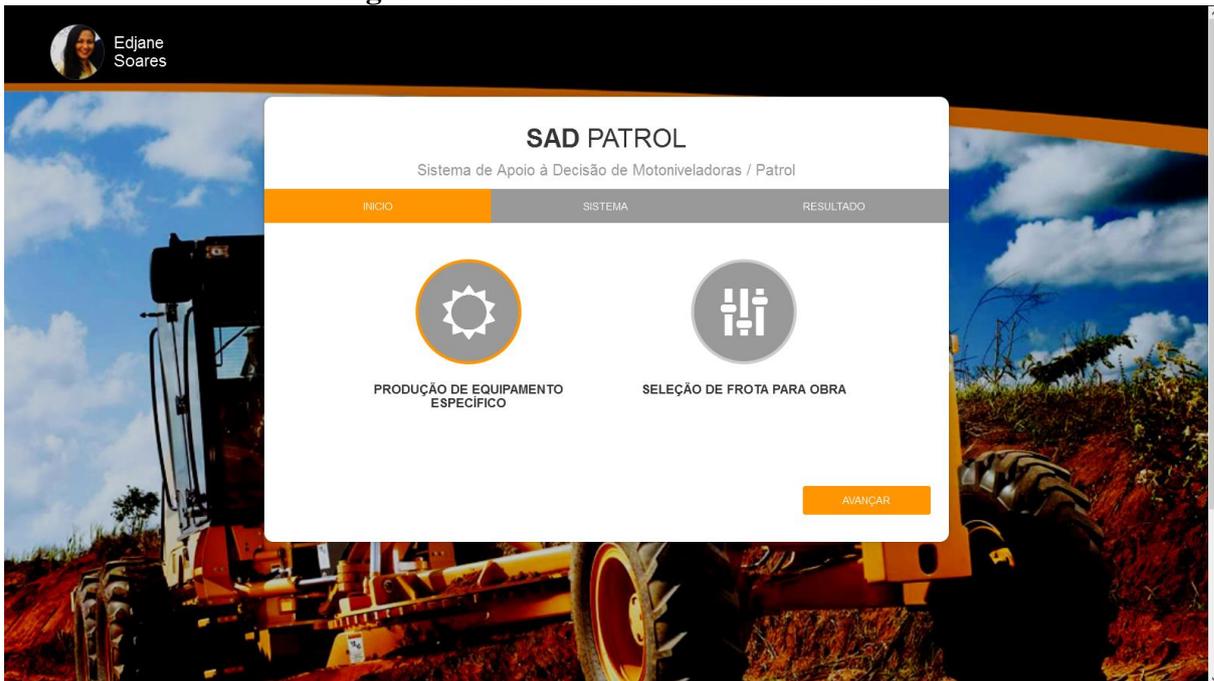
MySQL é um banco de dados de código aberto mais popular do mundo. Com sua velocidade superior, confiabilidade e facilidade de uso, o MySQL tornou-se uma das opções mais aderidas para o desenvolvimento de sites e sistemas, pois elimina os principais problemas associados com o tempo de inatividade, manutenção e administração para as modernas aplicações *online* (MYSQL, 2015).

4.6. VERIFICAÇÃO DO SISTEMA

Na Tabela 3.3 são apresentadas as variáveis consideradas pelo SICRO para o cálculo de produtividade da motoniveladora em serviços de Compactação de Aterros a 95 % Proctor Normal, que foram analisadas individualmente no Capítulo 3. A Tabela 3.3 apresenta ainda o valor de produção encontrado utilizando tais variáveis. A verificação do sistema desenvolvido será feita utilizando os dados da citada tabela, sendo possível assim verificar se os valores de produção fornecidos pelo SADPATROL estão compatíveis com o calculado pelas planilhas do SICRO.

A tela inicial apresenta duas possibilidades ao usuário, o cálculo da *Produção de Equipamento Específico*, no qual o usuário insere informações do equipamento e do serviço que o mesmo irá realizar e recebe o resultado de quanto tal equipamento pode produzir por hora, podendo ser em m^2/h ou em m^3/h , dependendo do tipo de serviço que o equipamento irá realizar. A segunda opção, *Seleção de Frota para Obra*, o usuário insere as informações da obra (extensão, largura da plataforma, prazo, turno de trabalho, etc) e o sistema calcula, com todos os equipamentos que constam em seu banco de dados as opções de frotas, fornecendo a quantidade de equipamento necessária para a realização do serviço dentro do prazo estipulado. Como o que será verificado é a produção de um equipamento específico para um dado serviço (Tabela 3.3) a opção *Produção de Equipamento Específico* será selecionada, como mostrado na Figura 4.1.

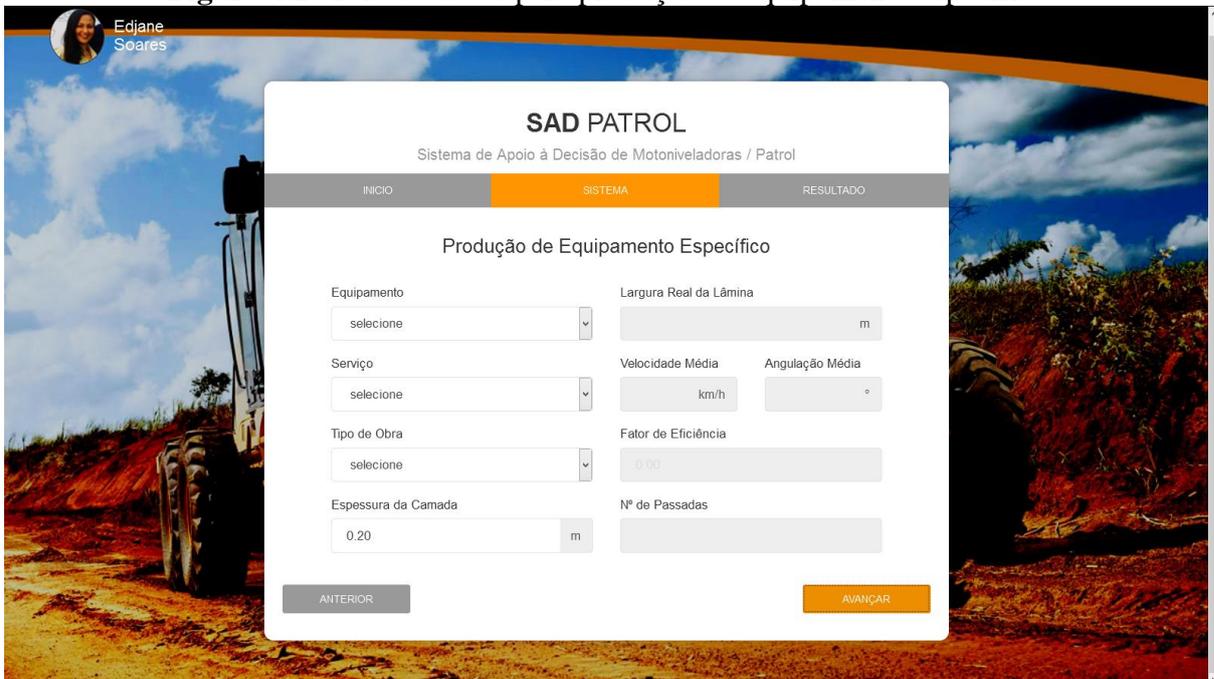
Figura 4.1: Tela inicial do SADPATROL.



Fonte: Autor.

Ao clicar em *Avançar* o sistema irá solicitar as informações necessárias ao cálculo, como apresentado na figura 4.2.

Figura 4.2: Tela de dados para produção de equipamento específico.



Fonte: Autor.

Ao clicar em *Equipamento* uma lista de modelos de motoniveladoras aparecerá para o usuário selecionar a utilizada, automaticamente a *Largura Real da Lâmina* é

preenchida. O usuário escolhe o tipo de *Serviço* no qual pretende utilizar o equipamento e os valores de *Velocidade Média*, *Angulação Média* e *Espessura Trabalhável* são automaticamente preenchido com os valores da Tabela 4.1, tabela esta desenvolvida a partir de valores mais comuns destas variáveis encontrados na literatura, assim reunindo o conhecimento no *software* de forma que mesmo um usuário inexperiente possa utilizar o sistema caso não possua dados medidos em campo. A variável *Espessura trabalhável* só é solicitada ao usuário se o serviço escolhido for *Espalhamento de Materiais* ou *Mistura de Materiais*.

Como avaliado no Capítulo 3, o número de passadas é uma das variáveis que mais afeta o resultado de produção, com coeficiente de variação de 31%, logo requer alta precisão em seu fornecimento pelo usuário, desta forma se o usuário não alterar o valor preenchido pelo sistema um alerta é emitido informando a redução de precisão no resultado, os valores de número de passadas preenchidos automaticamente são os obtidos da literatura conforme explicado no item 4.2.3.2 da presente pesquisa. Os valores preenchidos automaticamente, ou valores *default*, podem ser alterados a qualquer momento pelo usuário, que pode inserir dados medidos em campo para uma maior precisão no resultado. Os dados utilizados nesta verificação são os da Tabela 3.3, como apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3: Dados da verificação inseridos no sistema.

The screenshot displays the 'SAD PATROL' software interface. At the top left, there is a user profile for 'Edjane Soares'. The main header reads 'SAD PATROL - Sistema de Apoio à Decisão de Motoniveladoras / Patrol'. Below this is a navigation bar with three tabs: 'INICIO', 'SISTEMA' (which is highlighted in orange), and 'RESULTADO'. The central content area is titled 'Produção de Equipamento Específico' and contains several input fields:

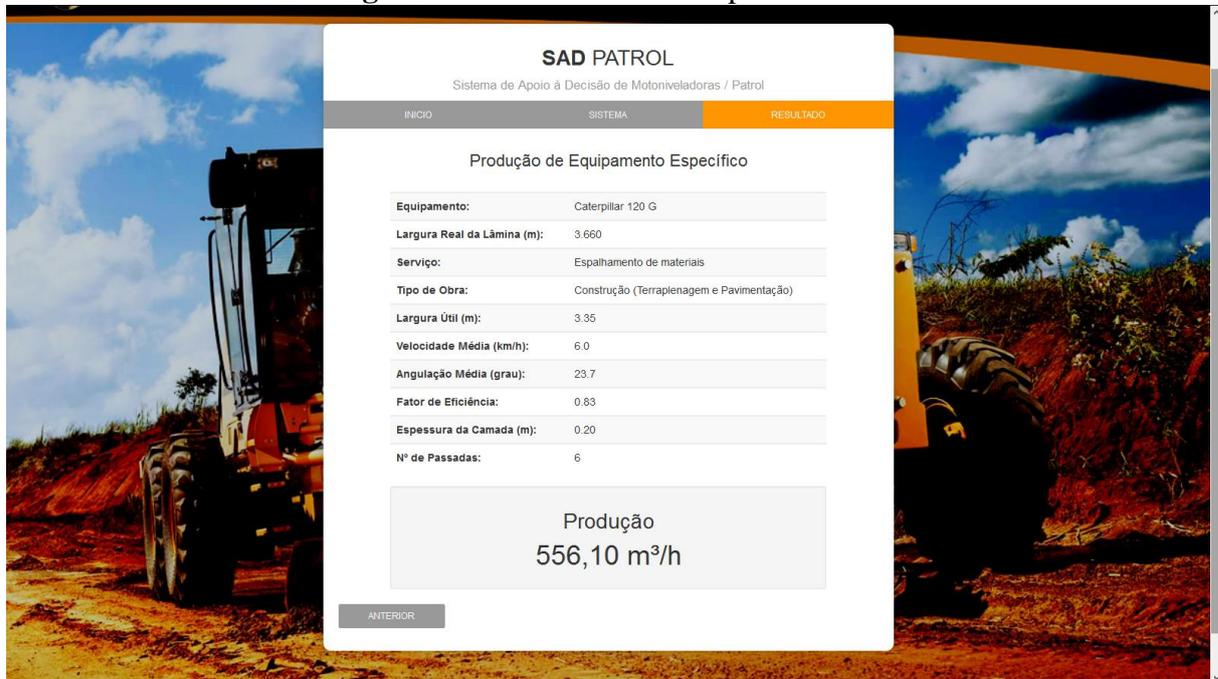
- Equipamento:** A dropdown menu showing 'Caterpillar 120 G'.
- Largura Real da Lâmina:** A text input field containing '3.660' with a unit 'm'.
- Serviço:** A dropdown menu showing 'Espalhamento de materiais'.
- Velocidade Média:** A text input field containing '6.0' with a unit 'km/h'.
- Angulação Média:** A text input field containing '23.7' with a degree symbol '°'.
- Tipo de Obra:** A dropdown menu showing 'Construção (Terraplenagem e Pavimen)'.
- Fator de Eficiência:** A text input field containing '0.83'.
- Espessura Trabalhável:** A text input field containing '0.20' with a unit 'm'.
- Nº de Passadas:** A text input field containing '6'.

At the bottom of the form, there are two buttons: 'ANTERIOR' (grey) and 'AVANÇAR' (orange).

Fonte: Autor.

Após preencher os dados solicitados no sistema e clicar em *Avançar*, um relatório (Figura 4.4.) com os dados utilizados e a produção calculada é apresentado.

Figura 4.4: Relatório emitido pelo sistema.



Fonte: Autor.

O resultado obtido nesta verificação foi compatível com o valor de produção apresentado na Tabela 3.3 obtida da planilha do SICRO, constatando assim a correta execução dos cálculos dentro do sistema. Uma série de outros testes foi feita com *software* para validá-lo, porém apenas este exemplo foi relatado, pois o mesmo tem sido utilizado em todas as avaliações nesta pesquisa.

4.7. APLICAÇÃO DO SISTEMA

No exemplo abaixo é demonstrado o processo de decisão com os cálculos feitos individualmente em comparativo com a utilização do *software*. O exemplo é fictício, porém é significativo, pois se assemelha à realidade encontrada em campo. O serviço é o acabamento de superfície de uma via de 70 km de extensão e plataforma de 9 metros de largura, com prazo para execução de 6 dias, sendo o turno de trabalho de 8 horas/dia, o usuário possui apenas uma motoniveladora Caterpillar 120H, necessita verificar se atenderá o prazo e caso não atenda precisa saber quantas e quais motoniveladoras irá precisar, além de quantas horas de trabalho elas necessitarão para executar o serviço dentro do prazo trabalhando em conjunto com a 120H de propriedade do usuário. Na seleção com os cálculos feitos individualmente

seria necessário primeiramente calcular o Volume/Área total a ser trabalhado. Neste caso como o serviço é de acabamento é necessário encontrar a área, dada pela Equação 4.8.

$$A_t = E \times L \quad (4.8)$$

em que:

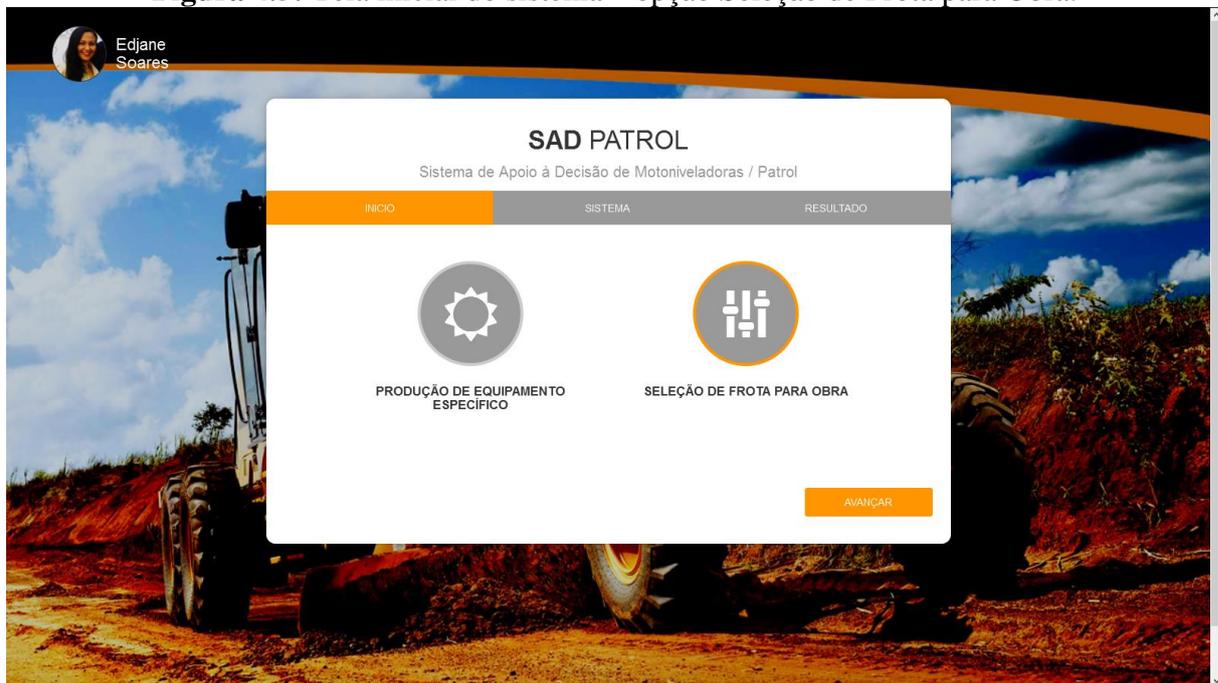
A_t : Área total a ser trabalhada [m²];

E : extensão da via [m];

L : largura da plataforma [m].

No caso apresentado, transforma-se a extensão para metros e calcula-se com a equação 4.8, a área total a ser trabalhada, que resulta em 630.000,00 m². No SADPATROL escolhe-se a opção *Seleção de Frota para Obra* e clica-se em avançar, como apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5: Tela inicial do sistema – opção Seleção de Frota para Obra.



Fonte: Autor.

Ao inserir as informações de obra (Figura 4.6) o *software* realiza as transformações de unidade necessárias e o cálculo da área total, armazenando tal informação pra utilização na próxima etapa.

Figura 4.6: Tela de dados para Seleção de Frota para Obra.

The screenshot displays the 'Seleção de Frota para Obra' (Fleet Selection for Work) form within the SAD PATROL system. The form is set against a background image of a construction site with a yellow Caterpillar motor grader. The interface includes a header with the user's name 'Edjane Soares' and a progress bar with three stages: 'INICIO', 'SISTEMA' (active), and 'RESULTADO'. The form fields are as follows:

Dados da Obra		
Tipo de Obra	Serviço	
Construção (Terraplenagem e Pavimen)	Acabamento de superfícies	
Prazo	Prazo Quantidade	Turno de Trabalho
Em Dias	6	8 h
Extensão	Largura da Plataforma	Área
70.00 km	9.00 m	630000.00 m²

Navigation buttons 'ANTERIOR' and 'AVANÇAR' are located at the bottom of the form.

Fonte: Autor.

A segunda etapa é verificar se a frota própria do usuário atende ao prazo estabelecido, desta forma é necessário calcular a produção horária do equipamento Caterpillar 120 H para o serviço de acabamento utilizando-se a Equação 3.3 e as variáveis da Tabela 4.1 e do tópico 4.2.3 que são as apresentadas pela literatura e consideradas neste estudo. Ao aplicar as variáveis na Equação 3.3 obtemos uma produção horária para o equipamento Caterpillar 120 H de 8.092,50 m²/h.

No SADPATROL após inserir as informações da obra e clicar em *Avançar*, uma nova janela é aberta para a inserção de frota própria do usuário, caso o mesmo possua equipamentos, como apresentado na Figura 4.7. Após selecionar o modelo do equipamento, sua produção já é calculada internamente pelo sistema (considerando as informações do equipamento e da obra já inseridas) e fornecida no campo *Produção*, as variáveis podem ser alteradas a qualquer momento pelo usuário caso o mesmo possua dados medidos em campo.

O botão com símbolo “+” pode ser acionado abrindo assim outro campo para a inserção de outros modelos de equipamentos que o usuário possua em sua frota própria, podendo o mesmo adicionar quantos e quais equipamentos quiser para serem considerados no cálculo da frota. Em todos eles a produção já é automaticamente calculada e somada ao final.

Figura 4.7: Tela de dados para frota própria do usuário.

Equipamentos da Frota

Equipamento	Qtde	Vel. Média	Ang. Média	Fat. Eficiência	Nº de Passadas	Produção
selecione	1	6.5 km/h	35.0 °	0.83		

Total da Produção:

VOLTAR CALCULAR

ANTERIOR

Fonte: Autor.

Como no exemplo em questão o usuário possui apenas 1 equipamento modelo Caterpillar 120H, o sistema se apresenta como na Figura 4.8.

Figura 4.8: Dados do exemplo de aplicação inseridos no sistema.

Equipamentos da Frota

Equipamento	Qtde	Vel. Média	Ang. Média	Fat. Eficiência	Nº de Passadas	Produção
Caterpillar 120 H	1	6.5 km/h	35.0 °	0.83	2	8092.50

Total da Produção: 8092.50 m³/h

VOLTAR CALCULAR

ANTERIOR

Fonte: Autor.

É possível observar que o valor de produção horária do equipamento da frota própria do usuário calculada pelo sistema está coerente com o valor calculado com os cálculos de forma individual. Em seguida é necessário calcular a produção diária do equipamento.

Para saber a produção diária do equipamento aplica-se a Equação 4.4 com a adaptação de suas unidades, para que se possa utilizar m^2 , conforme definido na Equação 4.9

$$Q_d = n \times Q \times t \quad (4.9)$$

em que:

- Q_d : produção diária da equipe [m^2 /dia];
- n : número de equipamentos;
- Q : produção horária do equipamento [m^2 /h];
- t : turno de trabalho diário [h].

Aplicando-se os dados ($n = 1$; $Q = 8.092,50 \text{ m}^2/\text{h}$; $t = 8\text{h}$) na Equação 4.9 obtém-se uma produção diária $Q_d = 64.740,00 \text{ m}^2/\text{d}$. E em seguida é necessário a realização de mais um cálculo para a verificação do prazo utilizando-se a Equação 4.5 adaptada para área, de acordo com a equação 4.10.

$$P = \frac{A_t}{Q_d} \quad (4.10)$$

em que:

- P : prazo, em dias corridos [dia];
- A_t : área a ser trabalhada [m^2];
- Q_d : produção diária do equipamento [m^2 /dia].

Ao executar o cálculo aplicando-se os dados ($A_t = 630.000,00 \text{ m}^2$; $Q_d = 64.740,00 \text{ m}^2/\text{d}$) na Equação 4.10 verifica-se que o prazo para execução do serviço com o equipamento da frota própria do usuário é de aproximadamente 10 dias de trabalho (9,7 dias) o que não atende ao prazo da obra que é de 6 dias, logo, será necessário a utilização de mais equipamentos, além do equipamento próprio do usuário.

No SADPATROL após inserir frota própria e clicar em *Calcular*, é aberta uma nova janela informando se a frota própria do usuário atende ou não à obra em questão e tempo para execução do serviço como mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Resultado da verificação de frota e dimensionamento do exemplo de aplicação.

A frota selecionada não atende o prazo para a realização da obra!

O prazo informado é de 6 dias e tempo de execução estimado para essa frota é de 9 dias e 6 horas

Para que o prazo da obra seja atendido você irá precisar de mais estes equipamentos:

Qtde.	Equipamento	Horas	Custo/Hora	Custo/Total
1	Caterpillar 24 M	15	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Volvo G990	23	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Caterpillar 16 M	23	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	LiuGong CLG 425	24	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Caterpillar 160 K	26	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Caterpillar 160 h	26	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Komatsu GD 655-5 Lâmina de 4,32 m	26	R\$ 0,00	R\$ 0,00

Fonte: Autor.

O resultado obtido pelo sistema está coerente com o calculado individualmente. Para calcular quantos e quais os equipamentos que serão necessários para realizar o serviço, além de quantas horas demandarão, será necessário executar as seguintes etapas de cálculo: a) primeiramente verificar o quanto da Área total de trabalho o equipamento próprio do usuário consegue executar dentro do prazo estabelecido de 6 dias; b) em seguida calcular a quantidade de área total que ainda necessitará ser trabalhada; c) calcular a produção horária dos 46 tipos de motoniveladora disponíveis no mercado brasileiro, e; d) posteriormente calcular o número necessário de equipamentos para a realização do serviço e em quanto tempo os mesmos são capazes de realizá-lo.

Para saber o quanto da Área total de trabalho o equipamento próprio do usuário consegue executar dentro do prazo estabelecido é necessário multiplicar a produção diária da equipe (Q_d) pelo prazo de 6 dias estabelecido, o que neste exemplo resulta em 388.440,00 m², ou seja, dos 630.000,00 m² de área a ser trabalhada no prazo de 6 dias o equipamento do usuário só consegue atender a 388.440,00 m², faltando assim 241.560,00 m² a serem trabalhados.

Para encontrar o número de equipamentos é necessário saber a produção média diária (Q_m) requerida para que a obra seja realizada dentro do prazo, para isso se utiliza a Equação 4.1 adaptada para área como apresentado na Equação 4.11.

$$Q_m = \frac{A_t}{P} \quad (4.11)$$

em que:

Q_m : produção média diária [m^2 /dia];

A_t : área a ser trabalhada [m^2];

P : prazo, em dias corridos [dia].

No caso em estudo, aplicando-se os dados ($A_t = 241.560,00 \text{ m}^2$; $P = 6$ dias) na Equação 4.11 é obtida uma produção média diária requerida de $40.260,00 \text{ m}^2$ /dia.

Em seguida, é necessário calcular a produção horária de cada modelo de equipamento motoniveladora para o serviço em análise utilizando-se a Equação 3.3 e as variáveis da Tabela 4.1 e as do tópico 4.2.3 que são as apresentadas pela literatura e consideradas neste estudo. Neste caso será exemplificado com o terceiro equipamento que aparece no banco de dados que é o modelo Case 885B, porém lembrando que esse mesmo cálculo deve ser feito para cada um dos 46 equipamentos da lista. Ao aplicar as variáveis na Equação 3.3 é obtida uma produção horária para o equipamento Case 885B de $9.441,25 \text{ m}^2$ /h.

Com os dados de produção estimada do equipamento e informações do turno de trabalho isso é possível calcular a produção diária do equipamento através Equação 4.2 adaptada para m^2 pela equação 4.12.

$$Q_d = Q \times t \quad (4.12)$$

em que:

Q_d : produção diária do equipamento [m^2 /dia];

Q : produção horária do equipamento [m^2 /h];

t : turno de trabalho diário [h].

Aplicando-se os dados ($Q = 9.441,25 \text{ m}^2$ /h; $t = 8$ h) na Equação 4.12 obtém-se uma produção diária do equipamento de $75.530,00 \text{ m}^2$ /dia. E para calcular o número mínimo de equipamentos para a execução do serviço dentro do prazo estabelecido utiliza-se a Equação 4.3 com as unidades em m^2 /dia, que no caso em estudo, dados $Q_m = 40.260,00 \text{ m}^2$ /dia e $Q_d =$

75.530,00 m²/dia, obtém-se o número de 0,53 equipamentos, ou seja, 1 equipamento Case 885B. Para saber quanto tempo este equipamento precisará trabalhar para executar o serviço requerido utiliza-se a Equação 4.13.

$$p = \frac{A_t}{n \times Q} \quad (4.13)$$

em que:

- p : prazo estimado para execução [h];
- A_t : área a ser trabalhada [m²];
- n : número de equipamentos;
- Q : produção horária do equipamento [m²/h];

Desta forma aplicando-se os dados ($A_t = 241.560,00$ m²; $n = 1$; $Q = 9.441,25$ m²/h) na Equação 4.13 sabe-se que 1 equipamento Case 885B levará aproximadamente 26 horas (25,58h) para executar o serviço. Assim, o usuário obteve uma solução para o seu dimensionamento de frota, com seu equipamento próprio trabalhando continuamente os 6 dias do prazo estabelecido e conseguindo executar 388.440,00 m² do total de 630.000,00 m² da área a ser trabalhada e um outro equipamento Case 885B trabalhando em uma segunda frente de serviço por 26 horas, ou 3 dias e duas hora considerando o turno de 8 h/dia. Para se obter outras opções de composição de frota para posteriormente calcular a de menor custo, o usuário teria que repetir os cálculos com os outros 45 equipamentos da lista e, em posse do valor de custo horário de cada equipamento e a quantidade de horas e quantidade de equipamentos que cada frota dimensionada demanda, calcular o custo final com a Equação 4.14.

$$Cf = n \times p \times Ch \quad (4.14)$$

em que:

- Cf : Custo final [R\$];
- n : número de equipamentos;
- p : prazo estimado para execução [h];
- Ch : Custo horário do equipamento [R\$/h].

Após calcular o custo de cada frota o usuário deveria organizar as opções em ordem crescente, dessa forma, são obtidas através de cálculos individuais as mesmas informações fornecidas pelo sistema, porém a utilização do SADPATROL proporciona a

praticidade da realização de todos esses cálculos de forma automática e organizada, em questão de segundos.

No SADPATROL os cálculos acima já são executados juntamente com a etapa de inserção de frota própria do usuário. Ao clicar em *Calcular*, além da verificação se a frota própria atende ou não à obra em questão, caso a mesma não atenda, o sistema já executa os cálculos com os 46 equipamentos do banco de dados, dimensionando-os para complementar a frota de forma que a mesma consiga atender ao prazo. E fornece ao usuário uma lista organizada por quantidade crescente de equipamentos e por quantidade crescente de horas para execução do serviço. Além de fornecer um campo, ao lado de cada equipamento, para inserção do custo horário. Na Figura 4.10 é possível ver que a quantidade e horas calculadas para o equipamento exemplificado CASE 885B é compatível com o calculado através dos cálculos individuais. Inserindo-se o valor de custo horário de R\$223,93 (SOBRATEMA, 2015) para a CASE 885B, encontrou-se seu Custo final para a realização do serviço, no exemplo da Figura 4.10 foi inserido ainda o valor do custo horário de uma Caterpillar 120K de R\$197,73 (SOBRATEMA, 2015) para demonstrar como o sistema organiza as frotas e compara os valores conforme o custo. Sempre que o usuário inserir o valor do custo horário do equipamento o sistema já leva o item para o topo da página onde será organizado de forma crescente como mostra a Figura 4.10.

Figura 4.10: Resultado do dimensionamento organizado por custo.

Produção da Frota

A frota seleccionada não atende o prazo para a realização da obra!

O prazo informado é de 6 dias e tempo de execução estimado para essa frota é de 9 dias e 6 horas
Para que o prazo da obra seja atendido você irá precisar de mais estes equipamentos:

Qtde.	Equipamento	Horas	Custo/Total
1	Case 885 B	26	R\$ 5.822,18
1	Caterpillar 120 K	30	R\$ 5.931,90

Qtde.	Equipamento	Horas	Custo/Hora	Custo/Total
1	Caterpillar 24 M	15	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Volvo G990	23	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Caterpillar 16 M	23	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	LiuGong CLG 425	24	R\$ 0,00	R\$ 0,00
1	Caterpillar 160 K	26	R\$ 0,00	R\$ 0,00

Fonte: Autor.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a presente pesquisa, apresentadas as potencialidades e limitações do sistema resultante da mesma e são feitas ainda neste capítulo recomendações para estudos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão na seleção de motoniveladoras para a execução de obras de terraplenagem e de pavimentação, e o mesmo foi atingido com o desenvolvimento do SADPATROL que verifica e dimensiona frotas de equipamentos motoniveladoras para a realização de serviços.

As etapas realizadas para o desenvolvimento do SAD deste estudo cumpriram os objetivos específicos estabelecidos previamente. Após a realização da revisão bibliográfica foi executado um estudo sobre o equipamento analisando-se as evoluções tecnológicas que o mesmo sofreu desde sua criação até os tempos atuais e de que forma elas influenciaram no aumento de produtividade do mesmo. Foi feita ainda uma avaliação de suas funções, operações, potencial e limitações no uso para serviços de terraplenagem e de pavimentação. A pesquisa se estendeu sobre os processos construtivos, além da produção do equipamento e dos modelos matemáticos a ela associados. Após selecionado o modelo matemático para compor o sistema, foi feita uma análise de cada variável do mesmo, identificando melhorias que foram incorporadas ao SAD. Criou-se um banco de dados relacionando os modelos existentes do equipamento no mercado, com as características relativas à sua produtividade e posteriormente agregando-se todas as informações obtidas foi possível desenvolver o SADPATROL.

Durante as pesquisas para compor o presente estudo não se encontraram relatos na literatura sobre análises da produção do equipamento motoniveladora e das variáveis que a afetam. Tal análise foi realizada neste trabalho, e através da mesma foi possível obter conclusões que comporam melhorias consideradas pelo sistema desenvolvido, como por exemplo, o sistema considera diversos equipamentos e seus variados comprimentos de lâmina, além de considerar angulações mais adequadas para cada tipo de serviço, e velocidades médias também conforme o tipo de serviço, que afetam consideravelmente o resultado final de produção. Foi possível também na presente pesquisa agrupar o

conhecimento de forma sistemática possibilitando até mesmo pessoas inexperientes em seleção de equipamentos conseguirem usufruir de tal conhecimento para obtenção de respostas à sua problemática, através de valores mais comuns (ou valores *default*) para as variáveis do cálculo de produção.

O SADPATROL agrupa-se aos demais sistemas desenvolvidos nos últimos anos por pesquisadores de diversas partes do mundo, trazendo o diferencial de calcular a produção da motoniveladora considerando a situação de campo informada pelo usuário para dimensionar a frota, já que a maioria dos sistemas desenvolvidos até o momento não consideram o equipamento motoniveladora e os poucos o fazem não calculam sua produtividade para o projeto dado, tornando o resultado de frota bastante empírico, pois o resultado disponibilizado é um número específico de equipamentos, estabelecido por especialistas, de acordo com o tamanho geral do projeto.

5.2 LIMITAÇÕES DO SISTEMA

Uma das limitações do sistema é o fato dele não considerar a influência da chuva em seus cálculos. O *software* possibilita que o usuário altere o fator de eficiência, porém o quanto esse fator diminuirá conforme a quantidade de chuva deverá ser calculado pelo usuário.

Outra consideração a respeito do sistema é o fato do mesmo apresentar uma abordagem determinística, ou seja, se utilizam valores fixos de variáveis, o que não considera que possa haver interferências ou situações imprevistas que resultem na alteração dos valores das variáveis. El-Moslmani *et al.* (2002) afirmam que 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. Porém o sistema é aberto para a alteração das variáveis de cálculo a qualquer momento, podendo o usuário inserir as obtidas em campo, ou seja, valores mais representativos dados às adversidades que possam ter ocorrido em campo, reduzindo assim o efeito dessa simplificação.

Outra limitação observada é fato do sistema solicitar os valores de custo horário do equipamento para calcular o custo final da frota, e não fornece valores *default* para esta informação. Essa limitação não interfere no dimensionamento da frota, objetivo principal do sistema, porém sem tal informação não é possível organizá-las conforme o menor custo. Segundo Ricardo e Catalani (2007) a determinação do custo horário é tarefa bastante difícil, por conta da diversidade de fatores que nele incidem, além da grande variedade de equipamentos existentes e

cujas características próprias são diferentes. Mas sabe-se que é possível determinar um provável custo horário de utilização, conhecendo-se as diferentes despesas que incidem na propriedade e operação de um equipamento.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como recomendações para pesquisas futuras e melhoria do atual sistema são indicadas:

- a) Pesquisar sobre a influência da chuva na execução de serviços com equipamentos motoniveladora, relacionando o quanto a produtividade é reduzida conforme a intensidade das chuvas e automatizar o cálculo inserindo-o no sistema.
- b) Calcular uma estimativa de custo horário do equipamento e fornecê-lo como valor *default* ao usuário, para que caso o mesmo não possua dados reais possa ainda assim obter um custo total de frota aproximado.
- c) Analisar os critérios de decisão para aluguel ou compra de equipamentos apresentados pela literatura e, após adotado o mais coerente para a realidade brasileira, inserir na lógica do sistema para assim fornecer ao usuário a escolha mais adequada para a situação em questão.
- d) Executar análise de tempos nos quais os operadores utilizam cada angulação de lâmina para a realização dos serviços, dessa forma será possível fazer ponderações dentro do cálculo de produção de motoniveladoras.
- e) Classificar os níveis de operadores conforme sua experiência e avaliar as faixas de velocidades com as quais os mesmos trabalham, sendo possível através da informação do nível do operador limitar a faixa de velocidade utilizada no cálculo reduzindo a abrangência do mesmo para cada serviço, e/ou da mesma forma que com a angulação, analisar tempos em que se permanece em cada velocidade para se possível ponderá-las na equação;
- f) Executar o estudo para os demais equipamentos assim será possível saber com precisão a produção de cada um e montar equipes de trabalho escolhendo um tipo de equipamento como líder e executando os cálculos para dimensionamento das frotas a partir de sua produção.

REFERÊNCIAS

- ALKASS, S., EL-MOSLMANI, K., e ALHUSSEIN, M. (2003) *A computer model for selecting equipment for earthmoving operations using queuing theory*. Annual Conference of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), Auckland, New Zealand, W78.
- ALKASS, S. e HARRIS, F. (1988). *Expert System for Earthmoving Equipment Selection in Road Construction*. J. Constr. Eng. Manage., 114(3), 426–440.
- ALSHIBANI, Adel, e MOSELHI, Osama. (2012) *Fleet selection for earthmoving projects using optimization-based simulation*. Canadian Journal of Civil Engineering, Volume 39, Number 6, June 2012, pp. 619-630
- AMIRKHANDIAN, S. e BAKER, N. (1992). *Expert System for Equipment Selection for Earth-Moving Operations*. J. Constr. Eng. Manage., 118(2), 318–331.
- BAESSO, D. P. e GONÇALVES, F. L. R.(2003) *Estradas Rurais, Técnicas Adequadas de Manutenção*. Florianópolis, Brasil.
- BARBOSA, V. H. B. (2012) *Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para Seleção de Equipamentos em Obras de Construção Rodoviária*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- CALHAU, Francisco Eduardo Contente (2013) *Apoio à decisão na seleção de equipamentos de escavação*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- CATERPILLAR (2009) *Manual de Produção 39*. Caterpillar INC. Peoria, E.U.A.
- CATERPILLAR (2011) Nivelamento inteligente. Motoniveladoras grandes.
Link: <https://mining.cat.com/cda/files/3268259/12/LMGBrochure_PT_LR.pdf> Data de publicação: 2011; Data de acesso: 20/01/2015.
- 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, Cândido do Rêgo (1955) *Terraplenagem Mecanizada. Teoria e Prática do Movimento de Terras por meio de Máquinas*. Editora Rodovia. Rio de Janeiro, Brasil.
- CHENG, F. F.; WANG, Y. W.; LING, X. Z. e BAI, Y. (2011) *A Petri Net Simulation Model for Virtual Construction of Earthmoving Operations*. Automation in Construction, v. 20, p. 181-188.
- COMMONS, wikimedia (2015) Link:
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Russell_Motor_Patrol_1919.JPG#filelinks>
Data de acesso: 20/01/2015.

CONSTRUCTION, Case (2012) 845B *Motoniveladora*. Catálogo.

DEPARTMENT OF THE ARMY, Headquarters (2000) *Field Manual - Earthmoving Operations*. Washington, DC, USA.

DNIT (2003a) *Manual de Custos Rodoviários. Volume 1: Metodologia E Conceitos*. 3. ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT (2003b) *Manual de Custos Rodoviários. Volume 4; Tomo 1: Terraplenagem E Pavimentação*. 3. ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT (2003c) *Manual de Custos Rodoviários. Volume 5: Composições de custos unitários de referência; serviços de conservação rodoviária..* 3. ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT (2003d) *Manual de Custos Rodoviários. Volume 7: Composições de custos unitários de referência; obras de restauração rodoviária..* 3. ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT (2005) *Manual de Conservação Rodoviária*. 2. ed. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT (2009a) Norma DNIT 106/2009-ES – *Terraplenagem – Cortes Especificação de Serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Brasil.

DNIT (2009b) Norma DNIT 108/2009-ES – *Terraplenagem – Aterros Especificação de Serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Brasil.

DNIT (2014) Link: <<http://www.dnit.gov.br/noticias/nota-de-esclarecimento-sobre-o-sistema-de-custos-rodoviaros-SICRO>> Data de acesso: 08/07/2014.

EAEMáquinas (2010). Revista Eletrônica, Ano VIII, n. 48, 2010. Link: <<http://revistadigital.eaemaquinas.com.br/em/eaemaquinas48/offline/download.pdf>> Data de acesso: 26/01/2015.

ELDIN, N. and MAYFIELD, J. (2005). *Determination of Most Economical Scrapers Fleet*. J. Constr. Eng. Manage., 131(10), 1109–1114

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.

- FIGUEIREDO, F. C. (2001) *GERENCIAMENTO DE OBRAS DE CONSTRUÇÃO PESADA: Metodologia para Apropriação de Custos de Equipamentos e Viaturas*. Dissertação, UFF - Niterói/Dez 2001.
- GUIMARÃES, N. (2001) *Equipamentos de Construção e Conservação*. Ed. UFPR, Curitiba, Brasil
- HADDOCK, Keith (1998) *Giant earthmovers : an illustrated history*. MBI Publishing Company. St. Paul.
- HADDOCK, Keith (2007) *The Earthmover Encyclopedia. The Complete Guide to Heavy Equipment of the World*. Motorbooks. June, 2007.
- 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.
- 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.
- IBM (2015) Link: <<http://www.ibm.com/developerworks/br/library/os-php-zend1/>> Data de acesso: 18/02/2015.
- ISO 6165 (2012), *Earth-moving machinery - Basic types - Identification and terms and definitions*.
- JRADE, A. e MARKIZ, N. (2012) *A Decision-Support Model Utilizing a Linear Cost Optimization Approach for Heavy Equipment Selection*. Construction Research Congress 2012: pp. 100-109.
- KOMATSU (2007) GD655-3 *Motoniveladora*. Catálogo.
- KUPRENAS, J. e HENKHAUS, T. (2000) *SSPE: A Tool for Scraper Selection and Production*. Computing in Civil and Building Engineering (2000): pp. 980-997.
- LIMSIRI, C. (2011) *Optimization of Loader-Hauler Fleet Selection*. European Journal of Scientific Research, v. 56, n. 2, p. 266-271.
- LORENTZ, Lisa (2014) Link: <<http://historicindianapolis.com/sunday-adverts-dont-read-this/>> Data de acesso: 19/01/2015.
- 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.
- MOSELHI, O. e ALSHIBANI, A. (2009). *Optimization of Earthmoving Operations in Heavy*

Civil Engineering Projects. J. Constr. Eng. Manage., 135(10), 948–954.

MYSQL (2015) Link: <<http://www.mysql.com/about/>> Data de acesso: 18/02/2015.

NIUSR (2015) Link: <<http://www.niusr.org/2015/01/05/grading-way-development-history-caterpillar-motor-graders/>> Data de acesso: 20/01/2015.

PEDROZO, L. G. (2001) *Custos da Infraestrutura Rodoviária - Análise e Sistematização*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil.

PEREIRA, A. L. (1961) *Equipamentos de Terraplenagem. Características e emprego*. Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, Brasil.

PESA (2014) Link: <<http://www.pesa.com.br/produtos/maquinas/motoniveladoras.htm>> Data de acesso: 09/07/2014.

PESA (2015a). Catálogo Motoniveladora 120K Caterpillar. Link: <<http://www.pesa.com.br/intra/specalog/catalogos/120K%20-%20APHQ5934.pdf>> Data de acesso: 26/01/2015.

PESA (2015b). Catálogo Motoniveladora 120M Caterpillar. Link: <<http://www.pesa.com.br/intra/specalog/catalogos/120M%20-%20ZPHQ5729-01.pdf>> Data de acesso: 26/01/2015.

PEURIFOY, R.; SCHEXNAYDER, C. J.; SHAPIRA, A.; SCHMITT, R. (2010) *Construction Planning, Equipment and Methods*. Ed. McGraw-Hill Book Co., New York, NY, USA.

PHP (2015) Link: <http://php.net/manual/pt_BR/preface.php> Data de acesso: 18/02/2015.

PRATA, Bruno de Athayde ; NOBRE JÚNIOR, E. F. ; Barroso, G. C. (2008) *A stochastic colored Petri net model to allocate equipments for earth moving operations*. Journal of Information Technology in Construction. ITCon, v. 13, p. 476-490, 2008.

RICARDO, H. S. e CATALANI, G. (2007) *Manual Prático de Escavação - Terraplenagem e Escavação de Rocha*. Ed. PINI, São Paulo.

RITCHIESPECS (2015) Link: <<http://www.ritchiespecs.com/searchresults?type=&category=Motor%20Grader&make=Caterpillar>> Data de acesso: 10/01/2015.

SENÇO, Wlastermiller de. (2001) *Manual de Técnicas de Pavimentação, Volume II*. 1, ed. São Paulo: Pini, 2001.

SOBRATEMA (2012) *Guia Sobratema de Equipamentos 2012-2014. Volume 01 – Escavação, carga e transporte*. São Paulo, Brasil.

SOBRATEMA (2015) Link: <<https://www.sobratema.org.br/CustoHorario/Tabela>> Data de acesso: 20/03/2015.

SOARES, M. E. S. (2011) *Solução de controle de máquinas com GPS para terraplenagem no*

Brasil. Monografia, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza-Ce, Brasil.

- TAVARES, R. (2008) *Proposta de um sistema de apoio à decisão para controle e gerenciamento agrícola em usinas de açúcar e álcool*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Brasil.
- TOURAN, A. (1990). *Expert System for Compactor Selection*. J. Transp. Eng., 116(3), 338–348.
- VELOSO, N. (2013b) *A evolução das soluções para construção de estradas. A Era das Máquinas*. Revista M&T – Manutenção & Tecnologia, n. 175, p. 78-80.
- VOLVO (2006) *Motoniveladoras Volvo G930, G940, G946, G960*. Catálogo. Curitiba, Brasil.
- VOLVO (2015). Volvo Construction Equipment.
Link:<<http://www.volvoce.com/constructionequipment/corporate/en-gb/AboutUs/history/products/motor%20graders/Pages/introduction.aspx>> Data de acesso: 18/01/2014.
- WAYMARKING (2014) Link:
<http://www.waymarking.com/waymarks/WMM0AY_Auto_Patrol_9_Grader_Fort_Missoula_MT> Data de publicação: 26/06/14; Data de acesso: 24/01/2015.
- XIE, T. X. (1997) *Using an expert system for earthmoving equipment selection and estimation*. The University of New Brunswick, Canada.