Campus de São Carlos

*RECALIBRAÇÃO DE UM MODELO PARA SIMULAÇÃO
DO TRÁFEGO EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES*

CINTIA YUMIKO EGAMI

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 26.10.101...

Ass.: *Paulo Roberto Santos*

Recalibração de um modelo para simulação do tráfego em rodovias de pista simples

Cintia Yumiko Egami

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017128

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de concentração: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Reynaldo Anselmo Setti.

São Carlos

2000

Class.	TESE FESC
Cuti.	3973
Tomo	0053/01

st 1133445

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

E28r

Egami, Cintia Yumiko

Recalibração de um modelo para simulação do tráfego em
rodovias de pista simples / Cintia Yumiko Egami. -- São
Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Reynaldo Anselmo Setti.

1. Rodovias de pista simples. 2. Modelos de simulação.
3. Recalibração. 4. Validação. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **CINTIA YUMIKO EGAMI**

Dissertação defendida e aprovada em 19-12-2000
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Profa. Doutora **HELENA BEATRIZ BETELLA CYBIS**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS)

Prof. Titular **JOÃO ALEXANDRE WIDMER**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Dr. **EDSON MARTINS DE AGUIAR**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Transportes

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

"É um paradoxo a Terra se mover ao redor do Sol e a água ser constituída por dois gases altamente inflamáveis. A verdade científica é sempre um paradoxo, se julgada pela experiência cotidiana que se agarra à aparência efêmera das coisas."

Karl Marx

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. José Reynaldo A. Setti, pela orientação na realização deste trabalho.

Ao Prof. John Morrall da Universidade de Calgary, pelas informações e ajuda fornecida no decorrer do trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela bolsa de estudos concedida.

Ao Sr. Armando Costa Ferreira, diretor regional do DR-8 do DER/SP, pelo fornecimento do projeto geométrico do trecho de rodovia estudado.

Ao Sr. Paulo Pacheco Fernandes, da empresa AUTOVIAS S/A, pelo suporte na realização das coletas de dados.

Ao Sr. Wagner Bonetti, da Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas S/A, pelo empréstimo de equipamento para coleta de dados.

À Cynthia Lotti, ao Ricardo Melo (Ricardinho), ao Mauro Kenji, à Márcia Lika e à Andréa Schopf (Deda) pela preciosa ajuda no levantamento dos dados.

Ao Sérgio Demarchi (Sergito) pelas dicas no uso das planilhas eletrônicas.

Aos amigos do Departamento de Transportes da EESC/USP, pelo apoio e incentivo em todas as horas, em especial à Ana Paula Larocca (Aninha), à Márcia Lika, à Sandra Oda e ao Fábio Wermesch.

Aos funcionários do Departamento de Transportes da EESC/USP, pelo suporte oferecido durante todo o trabalho.

À minha família, pelo apoio e paciência.

Em especial ao Mauro Kenji, pela compreensão, paciência e dedicação, pelas palavras de incentivo e carinho, e principalmente, por se fazer presente nas horas em que mais precisei.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo da pesquisa.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Estrutura do texto.....	3
2 MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE FLUXOS DE TRÁFEGO.....	4
2.1 Classificação dos modelos.....	4
2.2 Modelação matemática de rodovias de pista simples.....	5
2.2.1 <i>Visão geral dos modelos macroscópicos</i>	6
<i>Analogia com fluidos</i>	7
<i>Teoria cinética</i>	7
<i>Modelos multi-regimes</i>	8
2.2.2 <i>Visão geral dos modelos microscópicos</i>	8
<i>Car-following</i>	9
<i>Fast-vehicle</i>	9
<i>O modelo das duas velocidades</i>	10
2.2.3 <i>Análise empírica da operação de rodovias de pista simples</i>	10
2.3 Modelos de simulação.....	12
2.3.1 <i>Vantagens e desvantagens da simulação</i>	12
2.3.2 <i>Modelos para simulação de tráfego</i>	13
FREFLO.....	14
DYNASMART.....	14
INTEGRATION.....	15

NETSIM.....	15
TRARR e TWOPAS.....	15
3 SIMULAÇÃO DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES PELO MODELO TRARR.....	17
3.1 Descrição do programa.....	17
3.1.1 O processo de simulação do tráfego.....	18
3.2 Inicializando o TRARR.....	21
3.2.1 Executando uma simulação.....	22
3.2.2 Mudança nos parâmetros de entrada.....	22
3.3 Interpretando os resultados da simulação.....	23
3.4 Limitações do modelo.....	24
3.5 O uso do TRARR para simulação a de rodovias de pista simples paulistas..	24
4 DESCRIÇÃO DO MÉTODO.....	26
4.1 O processo de recalibração.....	26
4.2 Método escolhido.....	27
4.3 Coleta de dados.....	28
4.3.1 Equipamentos utilizados.....	29
Sensores para coleta automática de dados.....	30
Videocâmaras.....	31
4.3.2 Procedimentos de coleta de dados.....	32
4.3.3 Análise dos dados.....	33
4.4 Parâmetros recalibrados.....	42
4.5 Organização dos dados.....	43
4.5.1 Arquivo TRAF.....	43
Teste de aderência pelo χ^2	49
Método de Kolmogorov-Smirnov.....	50
4.5.2 Arquivo VEHS.....	50
4.5.3 Arquivo ROAD.....	55
4.6 Verificação da recalibração.....	57
4.7 Validação do modelo.....	57
5 RECALIBRAÇÃO DO MODELO.....	58
5.1 O processo de recalibração.....	58
5.2 Experimentos de simulação.....	59
5.2.1 Descrição dos experimentos de simulação.....	60
Experimento 0: Uso dos parâmetros originais do modelo.....	60
Experimento 1: Influência do número de categorias geradas.....	61
Experimento 2: Influência do headway crítico adotado para considerar um veículo em pelotão.....	61

<i>Experimento 3: Uso dos parâmetros originais dos automóveis.....</i>	62
<i>Experimento 4: Alteração dos parâmetros descritivos dos automóveis e dos veículos pesados.....</i>	62
<i>Experimento 5: Alteração do parâmetro descritivo da velocidade dos veículos.....</i>	62
<i>Experimento 6: Influência do “happy speed factor”.....</i>	63
5.2.2 <i>Discussão dos resultados obtidos no processo de recalibração.....</i>	63
<i>Experimento 0: Uso dos parâmetros originais do modelo.....</i>	63
<i>Experimento 1: Influência do número de categorias geradas.....</i>	67
<i>Experimento 2: Influência do headway crítico adotado para considerar um veículo em pelotão.....</i>	68
<i>Experimento 3: Uso dos parâmetros originais dos automóveis.....</i>	71
<i>Experimento 4: Alteração dos parâmetros descritivos dos automóveis e dos veículos pesados.....</i>	71
<i>Experimento 5: Alteração do parâmetro descritivo da velocidade dos veículos.....</i>	72
<i>Experimento 6: Influência do “happy speed factor”.....</i>	74
5.3 <i>Resumo das alterações feitas nos parâmetros do arquivo VEHS.....</i>	76
5.4 <i>Conclusões.....</i>	77
6 <i>VALIDAÇÃO DO MODELO.....</i>	80
6.1 <i>O processo de validação.....</i>	80
6.2 <i>Coleta de dados para validação do modelo.....</i>	81
6.3 <i>Experimentos de simulação para validação do modelo recalibrado.....</i>	83
6.4 <i>Discussão dos resultados das simulações.....</i>	84
6.4.1 <i>Porcentagem de veículos trafegando em pelotões.....</i>	85
6.4.2 <i>Velocidade média.....</i>	89
6.4.3 <i>Taxa de ultrapassagens.....</i>	91
6.5 <i>Considerações sobre a validação do modelo.....</i>	92
7 <i>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</i>	94
7.1 <i>Conclusões.....</i>	96
7.2 <i>Recomendações.....</i>	97
ANEXO A: <i>Variáveis dos arquivos de dados do TRARR.....</i>	100
<i>Arquivo TRAF.....</i>	101
<i>Arquivo VEHS.....</i>	103
<i>Arquivo ROAD.....</i>	107
<i>Arquivo OBS.....</i>	108
ANEXO B: <i>Exemplos de listagem dos arquivos de dados do TRARR.....</i>	109
<i>Arquivo TRAF.....</i>	110
<i>Arquivo VEHS.....</i>	112
<i>Arquivo ROAD.....</i>	116

<i>Arquivo OBS</i>	117
<i>Arquivo OUT</i>	118
<i>Arquivo MULTIP</i>	120
ANEXO C: Resultados dos experimentos de simulação.....	121
Resultados obtidos com os experimentos de simulação.....	122
a. Fluxo de tráfego.....	122
b. Velocidade média ao longo do trecho simulado.....	123
c. Taxas de ultrapassagens.....	124
d. Velocidade média por sentido de tráfego.....	125
e. Porcentagem de veículos em pelotões.....	127
ANEXO D: Modelos de planilhas para coleta de dados.....	128
Modelos de planilhas para coleta de dados.....	129
a. Planilha para contagem e classificação do tráfego.....	131
b. Planilha para contagem das manobras de ultrapassagem.....	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

LISTA DE FIGURAS

3.1	Representação das zonas de <i>warm-up</i> (mão inglesa).....	19
3.2	Etapas do modelo de simulação de rodovias TRARR.....	19
3.3	Fluxograma do programa TRARR.....	20
4.1	Indicação da localização da rodovia SP255.....	29
4.2	Esquema do trecho da SP255 onde foi realizada a coleta de dados.....	29
4.3	Local da coleta de dados na SP255.....	30
4.4	Sensor NC-97 para coleta automática de dados.....	30
4.5	Instalação do sensor NC-97 na faixa de tráfego.....	30
4.6	Uso de videocâmara na SP255.....	32
4.7	Esquema para coleta de dados de velocidade.....	34
4.8	Composição da corrente de tráfego na SP255.....	35
4.9	Composição direcional do fluxo de tráfego na SP255.....	36
4.10	Distribuição de velocidades no sentido N-S.....	39
4.11	Distribuição de velocidades no sentido S-N.....	40
4.12	Tráfego em pelotão na SP255, próximo ao km 33, sentido S-N.....	46
5.1	Velocidade média dos veículos obtida no experimento 0.....	64
5.2	Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 0.....	65
5.3	Taxa de ultrapassagens obtida no experimento 0.....	66
5.4	Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 2.....	70
5.5	Efeito do <i>happy speed factor</i> sobre a porcentagem de veículos em pelotões....	75
5.6	Efeito do <i>happy speed factor</i> sobre a velocidade média dos veículos.....	76
6.1	Perfil do trecho da SP255 onde foram feitas as coletas de dados para a validação do modelo.....	82
6.2	Comparação entre porcentagens de veículos em pelotões observada e obtidas com o modelo recalibrado e original para o sentido Norte-Sul.....	86
6.3	Comparação entre porcentagens de veículos em pelotões observada e obtidas com o modelo recalibrado e original para o sentido Sul-Norte.....	87

6.4 Comportamento dos pelotões obtido com o modelo recalibrado.....	88
6.5 Comparação entre as velocidades médias observadas e simuladas.....	89
6.6 Comparação entre as velocidades para o sentido Norte-Sul.....	90
6.7 Comparação entre as velocidades para o sentido Sul-Norte.....	90
6.8 Comparação entre as taxas de ultrapassagens observadas e simuladas.....	92

LISTA DE TABELAS

1.1	Extensão da rede viária pesquisada, em função do tipo de rodovia.....	2
4.1	Tipos de caminhões observados.....	34
4.2	Classificação dos veículos em função do comprimento.....	35
4.3	Frequência e frequência acumulada dos tipos de veículos.....	36
4.4	Tipos de veículos utilitários.....	37
4.5	Tipos de automóveis observados.....	37
4.6	Estado dos veículos na corrente de tráfego na SP255.....	41
4.7	Dados coletados com os sensores NC-97.....	41
4.8	Comparação dos dados obtidos pela filmagem e pelos sensores NC-97.....	41
4.9	Número de manobras de ultrapassagem.....	42
4.10	Parâmetros para recalibração do modelo.....	42
4.11	Opções para executar as simulações (<i>OPTION</i>).....	45
4.12	Valores atribuídos ao parâmetro <i>ADVGC</i> (%).....	47
4.13	Valores atribuídos ao parâmetro <i>VMIT</i> (veíc/h).....	48
4.14	Valores atribuídos aos parâmetros <i>VMF</i> e <i>VSDf</i> (km/h).....	48
4.15	Classes de veículos disponíveis no TRARR.....	51
4.16	Composição da corrente de tráfego na SP255.....	51
4.17	Modelo e marca dos veículos selecionados.....	52
4.18	Veículos com características semelhantes.....	53
4.19	Características físicas e mecânicas dos veículos pesados.....	53
4.20	Porcentagem dos veículos em cada classe.....	54
4.21	Distribuição dos veículos de acordo com as categorias.....	54
4.22	Valores atribuídos aos parâmetros <i>VXP</i> e <i>VNP</i> (kw/t).....	55
4.23	Parâmetros do arquivo ROAD.....	56
5.1	Velocidade média observada e simulada no experimento 0.....	64
5.2	Porcentagem de veículos em pelotões observada e simulada no experimento 0.....	65

5.3	Taxa de ultrapassagens observada e simulada no experimento 0.....	66
5.4	Fluxo de tráfego observado e simulado no experimento 1.....	67
5.5	Fluxo de tráfego, em porcentagem, observado e simulado no experimento 1.....	67
5.6	Diferença entre os fluxos de tráfego observados e simulados no experimento 1.....	68
5.7	Velocidade média obtida nos experimentos 1 e 2.....	69
5.8	Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 2.....	70
5.9	Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 3.....	71
5.10	Velocidade média obtida no experimento 3.....	71
5.11	Parâmetros descritivos dos veículos pesados.....	72
5.12	Velocidade média obtida no experimento 5.....	72
5.13	Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 5.....	73
5.14	Taxa de ultrapassagens obtida no experimento 5.....	73
5.15	Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 6.....	74
5.16	Velocidade média obtida no experimento 6.....	75
5.17	Taxa de ultrapassagens obtida no experimento 6.....	76
5.18	Valores dos parâmetros mecânicos alterados na recalibração do modelo.....	77
5.19	Valores dos parâmetros comportamentais alterados na recalibração do modelo.....	77
6.1	Valores dos parâmetros modificados no modelo recalibrado.....	80
6.2	Localização dos pontos marcados na SP255.....	81
6.3	Dados coletados na SP255 para validação do modelo.....	83
6.4	Ultrapassagens observadas no trecho estudado da SP255.....	84
6.5	Volume de veículos (veíc/h).....	84
6.6	Porcentagem de veículos em pelotões.....	86
6.7	Velocidade média dos veículos no trecho (km/h).....	89
6.8	Velocidade média dos veículos por sentido (km/h).....	91
6.9	Taxa de ultrapassagens na rodovia (ultrap/veíc.km).....	91
A.1	Variáveis do arquivo TRAF.....	101
A.2	Classes de veículos disponíveis no TRARR.....	103
A.3	Variáveis do arquivo VEHS.....	104
A.4	Variáveis do arquivo ROAD.....	107
A.5	Variáveis do arquivo OBS.....	108
C.1	Fluxo de tráfego observado e simulado.....	122
C.2	Velocidade média observada e simulada.....	123
C.3	Desvio padrão da velocidade média observado e simulado.....	123
C.4	Taxa de ultrapassagens.....	124

C.5 Velocidade média observada e simulada no sentido N-S.....	125
C.6 Desvio padrão da velocidade média observado e simulado no sentido N-S.....	125
C.7 Velocidade média observada e simulada no sentido S-N.....	126
C.8 Desvio padrão da velocidade média observado e simulado no sentido S-N.....	126
C.9 Porcentagem de veículos em pelotões no sentido N-S.....	127
C.10 Porcentagem de veículos em pelotões no sentido S-N.....	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARRB – ARRB Transport Research Ltd.

CNT – Confederação Nacional do Transporte

GEIPOT – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

HCM – Highway Capacity Manual

HRB – Highway Research Board

ITS – Institute of Transportation Studies

MRI – Midwest Research Institute

MULTIP – Arquivo de dados do TRARR com os valores dos multiplicadores de velocidade

OBS – Arquivo de dados do TRARR sobre os pontos observados na simulação

OUT – Arquivo de saída de dados do TRARR

N-S – Direção Norte – Sul

S-N – Direção Sul – Norte

TRAF – Arquivo de dados do TRARR sobre a corrente de tráfego simulada

TRARR – TRAffic on Rural Roads

TRB – Transportation Research Board

VEHS – Arquivo de dados do TRARR sobre os veículos simulados

VDM – Volume Diário Médio

RESUMO

EGAMI, C. Y (2000) Recalibração de um modelo para simulação do tráfego em rodovias de pista simples. São Carlos, 2000. 137p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O objetivo desta pesquisa foi recalibrar um modelo de simulação de rodovias de pista simples a fim de seja possível usá-lo no estudo de estradas do Estado de São Paulo. O modelo escolhido para recalibração é o TRARR (*TRAffic on Rural Roads*) versão 4.0, desenvolvido na Austrália pelo ARRB *Transport Research Ltd*. A recalibração do modelo consistiu em alterar parâmetros referentes ao desempenho (relação potência/massa) e características (massa, comprimento) dos veículos pesados e um parâmetro relativo ao comportamento dos veículos quando viajando em pelotões, de tal modo que os resultados da simulação ficassem compatíveis com os observados em campo. As medidas de desempenho escolhidas para a recalibração foram: a porcentagem de veículos trafegando em pelotões, a velocidade média dos veículos e a taxa de ultrapassagens. Os dados para a recalibração do modelo foram coletados num trecho de 2,8 km de extensão, na rodovia SP 255, entre as cidades paulistas de Araraquara e Ribeirão Preto. No processo de recalibração, as medidas de desempenho observadas no campo foram comparadas com as produzidas pelas versões recalibrada e original do simulador. Ao final da recalibração, pôde-se concluir que as duas versões do modelo são capazes de simular adequadamente o trecho estudado, sendo que o modelo recalibrado produz resultados ligeiramente melhores que os da versão original. O modelo recalibrado foi validado simulando-se um trecho de 10 km de extensão da SP 255 e comparando-se os valores medidos no trecho para as medidas de desempenho escolhidas com os valores produzidos pela versão recalibrada do simulador. Os resultados dessa comparação indicam que o modelo pode ser considerado capaz de simular adequadamente a operação de rodovias de pista simples no Estado de São Paulo. Os resultados do estudo também sugerem que a precisão pode ser melhorada com um ajuste fino de alguns dos parâmetros não modificados durante a recalibração.

Palavras-chave: rodovia de pista simples, simulação, modelos de simulação, recalibração e validação.

ABSTRACT

EGAMI, C. Y (2000) Recalibration of a traffic simulation model for two-lane highways. São Carlos, 2000. 137p. Dissertation (MSc.) –São Carlos School of Engineering, Universidade de São Paulo.

The objective of this research is to recalibrate a two-lane highway simulation model to allow its employment within the context of the São Paulo state highways, Brazil. The model chosen for this recalibration is TRARR (TRAffic on Rural Roads) version 4.0, originally developed in Australia by ARRB Transport Research Ltd. The procedure used for the model recalibration consisted in modifying input parameters related to heavy vehicle dimensions and performance characteristics (power/mass ratio, weight and length) as well as to the behavior of vehicles in platoons, in such a way that the model outputs are compatible with real traffic behavior. Three measures of performance were chosen for recalibration of the model: percent of journey time spent following, average speed and overtaking rate. Data for model recalibration were collected at a 2.8 km rural section of SP 225, a highway which connects the cities of Ribeirão Preto and Araraquara in the state of São Paulo (Brazil). The recalibration procedure was based on comparisons of the measures of performance observed on the real highway with those produced by the simulator's recalibrated and original versions. At the end of the recalibration process, both the recalibrated and the original models were considered capable of reproducing the traffic behavior on a two-lane highway similar to the ones in the state of São Paulo. Furthermore, it was concluded that the recalibrated model is capable of producing results slightly better than the original one. The recalibrated model was submitted to a validation procedure in which a 10 km section of SP 255 was simulated and the measures of performance obtained with the model were compared to field observations. The results of the validation procedure indicate that recalibrated version of TRARR is capable of simulating traffic operations on rural two-lane highways in the state of São Paulo. The results of the research also suggest that the model results may be improved with fine-tuning of some of the parameters that were not modified during the recalibration procedure.

Keywords: two-lane highways, simulation, simulation models, recalibration and validation.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Em rodovias de pista simples, ou seja, aquelas que possuem uma faixa de tráfego em cada direção, as ultrapassagens são feitas usando-se a faixa de tráfego oposta, sempre que o intervalo existente entre dois veículos consecutivos (*gap*) e a distância de visibilidade permitirem.

Para o estudo da operação destas rodovias, é conveniente representar as características do tráfego e o comportamento dos motoristas através de modelos. Inicialmente, isso era feito através de modelos matemáticos que, apesar de diversas suposições simplificadoras, sempre resultavam num conjunto de equações de difícil solução. Assim, foram desenvolvidos modelos de simulação que, apesar de mais complexos, mostraram-se mais eficientes para o estudo do tráfego nas rodovias de pista simples [McLean, 1989].

1.1 Objetivo da Pesquisa

O objetivo da pesquisa aqui relatada é recalibrar o modelo TRARR - *TRAffic on Rural Roads*, versão 4.0, desenvolvido na Austrália pelo ARRB *Transport Research Ltd.* (antigo *Australian Road Research Board*), para simulação do tráfego em rodovias de pista simples em zonas rurais.

O produto final obtido com esta pesquisa é uma versão do modelo TRARR capaz de simular o tráfego em rodovias de pista simples típicas do Estado de São Paulo. A disponibilidade deste modelo possibilitará o estudo de diversos aspectos da operação desse tipo de rodovia, tais como o efeito da construção de faixas adicionais, fatores de equivalência veicular para caminhões, análises custo-benefício de melhorias no traçado etc.

1.2 Justificativa

Segundo dados do Ministério dos Transportes, 63,11% do total de carga transportado no Brasil em 1997 foi feito pelo modo rodoviário [GEIPOT, 1998]. Ou seja, mais da metade de toda a produção nacional foi transportada através de rodovias, conferindo-lhes grande importância para a economia do país.

Além disso, as rodovias de pista simples compõem a maior parte da malha rodoviária brasileira. De acordo com dados de uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte – CNT, acerca das condições de conservação de 42.525 km de rodovias - 99,6% da malha rodoviária federal [GEIPOT, 1998], correspondente a 93,2% da rede pesquisada (39.630 km), eram de rodovias de pista simples, como pode ser visto na Tabela 1.1 [CNT, 1997].

Tabela 1.1: Extensão da rede viária pesquisada, em função do tipo de rodovia.

<i>Tipo de rodovia</i>	<i>Extensão (km)</i>	<i>Porcentagem</i>
1. Pista dupla		
com canteiro central	1.864	4,4%
com <i>guard-rail</i>	550	1,3%
sem divisão	481	1,1%
Pista simples		
com acostamento e com 3ª faixa nos aclives	10.477	24,6%
com acostamento e sem 3ª faixa nos aclives	23.179	54,5%
sem acostamento e com 3ª faixa nos aclives	791	1,9%
sem acostamento	5.183	12,2%

Fonte: Confederação Nacional do Transporte [CNT, 1997].

Ainda que a maior parte da rede rodoviária formada por rodovias de pista simples apresente baixos volumes de tráfego, este tipo de rodovia é vital para a economia nacional, ligando a fronteira agrícola aos centros de consumo e portos. Daí, a importância de se estudar o comportamento do tráfego neste tipo de rodovia.

No entanto, dependendo da abordagem empregada, este estudo pode se tornar uma tarefa quase impossível por envolver diversos fatores, como os relacionados à geometria da rodovia, ao comportamento dos motoristas, aos tipos de veículos e as possíveis interações entre si. Por isso, a simulação está se tornando cada vez mais comum para o estudo das rodovias e de outros componentes viários.

Apesar de mais complexa, a simulação traz a vantagem de poder analisar situações que dificilmente seriam observadas no mundo real como, por exemplo, a operação da rodovia no limite de sua capacidade. Particularmente no que diz respeito ao estudo da capacidade e nível de serviço, os modelos de simulação vêm sendo usados para o desenvolvimento de estudos que fornecem os dados e parâmetros do *Highway Capacity Manual* - HCM, desde a sua edição de 1985 [McLean, 1983; Messer, 1983; Enberg & Pursula, 1991; Bloomemberg *et al.*, 1998; Vermijs, 1998].

Todavia, os simuladores hoje existentes foram desenvolvidos em países onde as características de desempenho dos caminhões são fundamentalmente diferentes das dos caminhões nacionais. A utilização desses simuladores da forma como foram calibrados e validados pelos seus autores só fornecem resultados confiáveis se a situação simulada for tal que os caminhões estejam operando abaixo de seu limite de desempenho, por exemplo, em trechos urbanos sem rampas.

Assim, a utilização do TRARR depende de um estudo prévio da necessidade de recalibração e validação do modelo e tem como objetivo a obtenção de um modelo que represente adequadamente as rodovias de pista simples e a corrente de tráfego que por ela circula normalmente. A sua utilidade está na análise dos problemas presentes nessas rodovias, tais como a influência do aumento do volume de tráfego, condições desfavoráveis de visibilidade ou ultrapassagem, entre outros.

1.3 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado em sete partes distintas. A primeira delas, o capítulo 1, apresenta os objetivos da pesquisa e uma justificativa para o seu desenvolvimento. O capítulo 2 apresenta uma visão geral dos modelos matemáticos e de simulação do tráfego em rodovias de pista simples. O capítulo 3 contém a descrição do modelo TRARR, com o detalhamento dos arquivos usados e de como a simulação é executada.

O capítulo 4 contém a descrição da coleta de dados, enfocando os equipamentos e métodos empregados e os dados que foram coletados, bem como os locais escolhidos. A recalibração do modelo é apresentada no capítulo 5. A validação do modelo é apresentada no capítulo 6. As conclusões e recomendações são apresentadas no capítulo 7. No final do trabalho são apresentados os anexos A e B. O anexo A contém uma descrição das variáveis dos arquivos de dados do TRARR e o anexo B contém exemplos de listagem desses arquivos de dados.

Capítulo 2

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE FLUXOS DE TRÁFEGO

Um modelo é a representação simbólica, lógica, matemática ou computacional de um sistema real, que é um conjunto de partes inter-relacionadas e interdependentes que realizam atividades coordenadas visando atingir uma meta comum. Esse modelo normalmente tem a forma de um conjunto de suposições relativas à operação e ao funcionamento do sistema real. O modelo é também uma simplificação desse sistema real, mas que deve ser suficientemente detalhado para que as conclusões obtidas sejam representativas e aplicáveis ao sistema real [Setti, 1994].

No entanto, de acordo com McLean [1989], a resolução de modelos matemáticos para a análise do fluxo de tráfego em uma rodovia de pista simples envolve, muitas vezes, equações muito complexas e de difícil solução. Assim, com o objetivo de contornar esse problema, foram criados os modelos de simulação, cujo uso vem aumentando devido à facilidade de acesso aos computadores.

2.1 Classificação dos modelos

Em engenharia, um modelo é a representação da realidade. Os modelos podem ter várias formas, tais como experimentos controlados, analogias físicas ou funções matemáticas. Um modelo matemático é um conjunto de uma ou mais equações que representam as relações entre as características quantificáveis de um segmento da realidade [McLean, 1989]. Os modelos matemáticos, que também abrangem os modelos de simulação, podem ser classificados em [Setti, 1994]:

- Estático ou dinâmico: o modelo estático representa o sistema em um dado instante, já o dinâmico, reproduz as mudanças que o sistema sofre no decorrer do tempo.
- Determinístico ou estocástico: para um dado conjunto de condições, um modelo determinístico irá fornecer um resultado específico, já o modelo estocástico contém um certo grau de aleatoriedade tal, que há uma série de possíveis resultados para um dado conjunto de condições.
- Discreto ou contínuo: em um modelo discreto, as variáveis que representa o fenómeno variam pontualmente no decorrer do tempo, diferente de um modelo contínuo, onde elas variam continuamente ao longo do tempo.

2.2 Modelação matemática de rodovias de pista simples

As rodovias de pista simples são aquelas que possuem duas faixas usadas para o tráfego, uma em cada direção. Dessa forma, a ultrapassagem de veículos mais lentos requer o uso da faixa de tráfego oposto onde a distância de visibilidade e o *gap* forem suficientes.

De acordo com as definições apresentadas no item 2.1, pode-se afirmar que o fluxo de tráfego é um sistema estocástico, sujeito a variações aleatórias tanto nas características dos veículos quanto no comportamento dos motoristas e, também, nas interações veiculares, difícil de ser modelado [McLean, 1989].

Os primeiros modelos matemáticos que pretendiam ser aplicados ao estudo do fluxo de tráfego nas rodovias de pista simples eram tratados como ‘se fossem’ determinísticos, mas mesmo assim, segundo Drew [1968] *apud* McLean [1989]: “a dificuldade em se utilizar uma abordagem determinística não está em resolver uma equação diferencial mas em encontrar uma que expresse a condição física realisticamente.”

Todavia, as operações de tráfego em determinado trecho de uma rodovia de pista simples podem ser representadas por um conjunto de equações, como qualquer outro modelo matemático. Essas equações devem, segundo McLean [1989], atender a quatro objetivos básicos, ou regras:

- Fornecer uma base conceitual de como estudar, analisar ou interpretar o fenómeno do tráfego;
- Possibilitar uma avaliação do comportamento do fluxo de tráfego considerando vários parâmetros relativos aos motoristas, tráfego e rodovia;

- Ser capaz de prever as mudanças no comportamento do tráfego, que poderiam resultar de alterações nas condições existentes;
- Fornecer uma previsão do desempenho atual do tráfego para um determinado conjunto de condições impostas.

Desse modo, as hipóteses a serem adotadas no desenvolvimento de um modelo devem ser adequadas, tanto aos parâmetros que serão estudados quanto aos que serão obtidos, e devem ser determinadas de acordo com os objetivos que serão atendidos. De acordo com McLean [1989], no desenvolvimento desse modelo matemático, há quatro etapas básicas que devem ser seguidas e são:

- Conceituação: levantamento das hipóteses que representarão a situação estudada;
- Formulação: definição dos parâmetros do modelo e das relações entre os mesmos;
- Calibração: determinação dos valores numéricos adequados para os parâmetros definidos na etapa anterior;
- Validação: validação do modelo para aplicá-lo de acordo com as hipóteses levantadas inicialmente.

2.2.1 Visão geral dos modelos macroscópicos

As propriedades típicas de uma corrente de tráfego, ou seja, fluxo, densidade e velocidade, são definidas como:

- Fluxo ou volume (q): número n de veículos que passam por determinado ponto da via em um intervalo de tempo t :

$$q = \frac{n}{t} \quad (2.1)$$

- Densidade ou concentração (k): número n de veículos que ocupam um trecho de via de comprimento x num determinado instante de tempo:

$$k = \frac{n}{x} \quad (2.2)$$

- Velocidade (v): para os modelos macroscópicos a velocidade adotada é a velocidade média, que pode ser ou a velocidade média no tempo ou no espaço. A velocidade média no tempo, ou velocidade instantânea, é a média aritmética das velocidades dos veículos passando por determinado ponto. A

velocidade média no espaço é a média aritmética das velocidades dos veículos que estão num determinado trecho da via.

As relações entre essas características da corrente de tráfego são denominadas de modelos macroscópicos [McLean, 1989] e o mais famoso é o de Greenshields, datado de 1935. Posteriormente, outros modelos macroscópicos foram desenvolvidos. A seguir serão feitos comentários breves sobre alguns dos modelos macroscópicos conhecidos.

Analogia com fluidos

Este modelo baseia-se nas similaridades existentes entre o fluxo de tráfego e o fluxo de um fluido [Pipes, 1968 *apud* McLean, 1989]. Apesar do tráfego ser composto de um número finito de veículos com características que não são necessariamente homogêneas, ao contrário do fluxo de fluido, que é contínuo, a analogia com fluido tem fornecido bons resultados na modelagem do comportamento do tráfego [McLean, 1989].

Teoria Cinética

O modelo da Teoria Cinética (*Kinetic Theory*) descreve o tráfego por meio de uma analogia com a teoria molecular dos gases [Prigogine & Herman, 1971 *apud* McLean, 1989]. O modelo engloba três processos no desenvolvimento de sua teoria: a relaxação, a interação e o ajuste. A equação geral da Teoria Cinética é expressa como:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} = \left[\frac{\partial f}{\partial t} \right]_{\text{relax}} + \left[\frac{\partial f}{\partial t} \right]_{\text{int}} + \left[\frac{\partial f}{\partial t} \right]_{\text{aj}} \quad (2.3)$$

Essa equação descreve a evolução da distribuição de velocidade (u) dos carros, $f[u, k(x,t), t]$, em uma rodovia com características homogêneas, no local x , no tempo t , onde $k(x,t)$ é a concentração de carros naquele ponto [Gerlough & Huber, 1975].

Dada a complexidade matemática da formulação e da variedade de parâmetros requerida para descrever os três processos, esse modelo não é adequado para a previsão do comportamento do tráfego. Apesar disso, ele propicia grande compreensão sobre os fatores que afetam o fluxo de tráfego e poderia fornecer uma estrutura geral para a análise e interpretação dos estudos do fluxo de tráfego [McLean, 1989].

Modelos multi-regimes

Os modelos multi-regimes são aqueles em que diferentes formulações matemáticas são usadas para descrever o fluxo de tráfego em diferentes regimes de fluxo-densidade [Eddie, 1961; Underwood, 1961 - *apud* McLean, 1989]. Entretanto, esses modelos se mostraram imprecisos em relação à formulação matemática adotada para representar as características da corrente de tráfego [McLean, 1989]. Para tentar contornar os problemas apresentados por esses tipos de modelos, foram desenvolvidos os modelos microscópicos, com maior relevância para a operação de tráfego em rodovias de pista simples.

2.2.2 Visão geral dos modelos microscópicos

Os modelos microscópicos de rodovias de pista simples são baseados nas interações individuais entre os veículos e, devido à natureza estocástica de tais interações, a maioria dos modelos desse tipo fazem uso da teoria da probabilidade para a previsão do progresso dos veículos em um fluxo de tráfego ou das características gerais desse fluxo [McLean, 1989].

As características do fluxo de tráfego, como por exemplo, velocidade da corrente, *headway* entre os veículos e manobras de ultrapassagens, resultam de processos aleatórios, que interagem de várias formas. Para formular esse fluxo matematicamente é necessário ‘abstrair e idealizar’ os processos para mantê-los dentro de limites manuseáveis. Segundo McLean [1989], isso pode ser conseguido de várias formas:

- Admitindo uma distribuição idealizada para uma variável aleatória;
- Substituindo variáveis aleatórias por relações determinísticas;
- Substituindo uma variável aleatória por um valor médio único.

Desse modo, muitos modelos foram desenvolvidos para a solução de problemas específicos. Eles são aplicáveis na previsão dos efeitos de mudanças nas propriedades básicas do fluxo, como velocidade ou desempenho dos veículos. No entanto, ao interpretar os resultados obtidos por esses modelos, o usuário deve estar ciente de suas hipóteses simplificadoras e conseqüentes limitações [McLean, 1989].

Conforme discutido no item 2.2, os modelos microscópicos atendem aos dois primeiros dos quatro objetivos dos modelos matemáticos, ou seja, fornecer uma base conceitual de como estudar, analisar ou interpretar o fenômeno do tráfego e possibilitar uma avaliação do comportamento do fluxo de tráfego para vários parâmetros relativos aos motoristas, tráfego e rodovia. Por isso podem ser considerados mais adequados

para o estudo do tráfego em rodovias de pista simples do que os modelos macroscópicos. Alguns dos modelos microscópicos mais conhecidos são discutidos a seguir.

Car-following

Esse modelo representa o comportamento dinâmico de uma corrente de tráfego e é baseado no princípio do estímulo-resposta, em que, a resposta ao estímulo ocorre depois de um certo tempo T , e sua magnitude é proporcional à magnitude do estímulo [Gazis *et al.*, 1961 *apud* McLean, 1989]. Ou seja, a resposta é a reação de um motorista ao movimento do veículo que o precede na corrente de tráfego. A resposta de sucessivos motoristas na corrente de tráfego é acelerar ou desacelerar na proporção da magnitude do estímulo [Gerlough & Huber, 1975].

Fast-vehicle

O modelo microscópico denominado *fast-vehicle* considera o progresso de um único veículo veloz (*fast-vehicle*) em uma corrente com fluxo de veículos mais lentos, todos viajando na mesma velocidade. Esse modelo verifica a influência sofrida por um veículo com relação às características do próprio veículo, do motorista e da corrente de um modo geral [McLean, 1989]. O caso mais simples foi o derivado por Tanner em 1958 e depois modificado em 1961 [McLean, 1989]. Na versão de 1958, assumia-se que os veículos eram pontos que não ocupavam nenhum espaço na corrente. Já na segunda versão, os veículos possuíam um comprimento d , correspondente ao espaçamento entre os veículos em pelotões.

Na versão de 1961, a estimativa dos *headways* em cada corrente era baseado na chegada dos veículos segundo uma distribuição de Poisson, equivalente ao processo de saída para um único canal de atendimento em um sistema de filas com chegadas aleatórias e tempo de serviço fixo, o que resulta em pelotões de tamanho n dado pela seguinte distribuição de probabilidades:

$$p(n) = \frac{e^{-nm} (nm)^{n-1}}{n!} \quad (2.4)$$

em que m : proporção do espaço ocupado na rodovia por veículos na corrente primária (designada com o número 1) e oposta (designada com o número 2), sendo que m pode ser igual a $k_1 d$ ou $k_2 d$.

k : densidade da corrente.

O tamanho médio do pelotão para essa distribuição é:

$$\bar{n} = E(n) = \frac{1}{1 - m} \quad (2.5)$$

Um dos problemas apresentados por esse modelo foi a superestimação do tempo em que os veículos devem seguir em pelotões, devido à subestimação do comprimento de *headways* na corrente oposta [McLean, 1989].

O modelo das duas velocidades

O modelo das duas velocidades considera a corrente de tráfego composta por somente duas classes de veículos, lentos e rápidos, desenvolvendo também, somente duas velocidades bem definidas. Entretanto, os resultados obtidos através desse modelo não são relevantes ao estudo da corrente real, composta geralmente de várias classes de veículos com velocidades características diferentes [McLean, 1989].

2.2.3 Análise empírica da operação de rodovias de pista simples

A operação de uma rodovia de pista simples pode ser analisada através das relações empíricas que existem entre volume, velocidade e densidade do fluxo de tráfego. Um exemplo desse tipo de análise é a realizada por Garcia [1993], que estudou quatro trechos de vias arteriais na Venezuela: Caracas–Maracaibo–Los Teques, Maracaibo–Perijá, Mérida–Ejido e Valencia–Guaraca. Essas vias foram escolhidas por possuírem características geométricas semelhantes e terem um comportamento de tráfego homogêneo. O objetivo era obter a forma geral das relações entre densidade-volume-velocidade. Desse estudo, concluiu-se que o valor encontrado para a velocidade de operação nas cidades venezuelanas é maior que o proposto pelo HCM – 1985, mas uma análise comparativa das curvas revelou uma morfologia similar entre elas.

Polus *et al.* [1991] também estudaram as características de fluxo e capacidade em duas rodovias de pista simples bastante movimentadas em Israel. Nesses locais foram coletados dados que permitiram analisar as relações velocidade-volume, velocidade-densidade e volume-densidade. Os dados foram coletados somente nos períodos de pico das quartas-feiras em duas seções escolhidas por terem mais de 10.000 veíc/dia de tráfego médio diário (VDM). As coletas foram feitas através de uma câmera de vídeo posicionada em um ponto elevado, permitindo abranger aproximadamente meio quilômetro de rodovia. Concluiu-se que a capacidade da rodovia é sensível às características

geométricas locais e que a velocidade em que a mesma ocorre, era menor que a velocidade geralmente recomendada pelo HCM – 1985.

Yagar [1983], em um estudo realizado no Canadá sobre a capacidade de rodovias de pista simples, revelou que a capacidade do HCM – 1965, estabelecida como 2.000 veíc/h em ambas as direções em condições ideais, é inconsistente com os valores observados normalmente. A capacidade encontrada varia significativamente com as condições meteorológicas, presença de veículos lentos nas rampas e distribuição direcional do tráfego. Esse estudo causou a modificação no valor da capacidade estabelecido pelo HCM, que de 2.000 veíc/h na edição de 1965, passou para 2.800 veíc/h na edição de 1985.

Na Holanda e na Hungria, Botma & Fi [1991] realizaram um estudo simultâneo em duas seções de rodovias de pista simples, uma em cada país. O objetivo do estudo era encontrar os fatores, como a velocidade, *headways* e pelotões, que influenciavam no nível de serviço da rodovia. Foi usado o modelo de simulação australiano TRARR para obter os valores dos parâmetros que foram comparados com os sugeridos pelo HCM – 1985. Foi observado que as diferenças no tamanho da frota veicular e das semelhanças dos traçados das rodovias presentes na Hungria, Holanda e Estados Unidos (de onde o HCM se origina) poderiam influenciar os resultados obtidos.

Sobre as velocidades, observou-se que elas eram menores na Hungria, o que pode ser atribuído à diferença entre a potência média dos veículos em cada país. Entretanto, essas velocidades não puderam ser comparadas com velocidades observadas em rodovias norte-americanas, pela indisponibilidade de dados. A porcentagem de veículos em pelotões foi praticamente a mesma nos três países. Com relação à capacidade, os autores aconselham um estudo mais detalhado, pois os métodos usados forneceram resultados diferentes e, portanto, inconclusivos.

Em outro estudo sobre as rodovias de pista simples na Holanda, Botma [1986] fez uma comparação dos valores apresentados pelo HCM - 1985 (e adotados como parâmetro por muitos países) com os valores obtidos para o caso holandês. Determinou-se que a velocidade média era influenciada somente pelo volume e pela porcentagem de caminhões no tráfego, ao passo que o desvio padrão da velocidade decrescia substancialmente com o aumento do volume.

2.3 Modelos de simulação

Simular consiste em imitar a operação de um processo ou sistema real durante um certo tempo, o que requer a geração de uma história artificial do sistema [Setti, 1994]. Para o estudo científico desse sistema, é necessário que sejam propostas algumas hipóteses sobre o seu funcionamento. Essas hipóteses, que geralmente têm a forma de relações matemáticas ou lógicas, constituem um modelo, usado para se tentar entender como o sistema se comporta [Law & Kelton, 1991].

Portanto, recomenda-se adotar a simulação em casos nos quais o modelo representativo do sistema real seja muito complexo e virtualmente impossível de ser resolvido por técnicas matemáticas convencionais [Setti, 1994] – como é o caso dos fluxos de tráfego em rodovias de pista simples.

2.3.1 Vantagens e desvantagens da simulação

O desenvolvimento de estudos sobre simulação de tráfego deu-se a partir da necessidade de encontrar um modelo que incluísse fatores que antes não eram considerados pelos modelos analíticos tradicionais, como a geometria da rodovia e as características de desempenho dos veículos.

De acordo com McLean [1989], uma das maiores vantagens da simulação, oposta à observação do tráfego real, é a possibilidade do usuário controlar as variáveis. Ou seja, como num experimento de laboratório, inúmeros testes podem ser feitos com valores pré-selecionados das variáveis independentes para verificar se as diferenças observadas nas variáveis dependentes são somente resultado dessas modificações. Por outro lado, como em qualquer experimento de laboratório, sempre existirão dúvidas a respeito de quão preciso é o modelo em replicar o sistema físico que está sendo estudado.

Outras vantagens e desvantagens do uso da simulação podem ser citadas [Setti, 1994]:

- O modelo pronto pode ser usado inúmeras vezes para analisar soluções alternativas no funcionamento e na estrutura do sistema;
- Dados obtidos através de simulação são muito mais baratos que dados coletados em campo;
- Os modelos podem ser caros e consumir muito tempo para a sua elaboração e validação;

- Os modelos de simulação necessitam de um grande número de replicações para garantir a qualidade de seus dados de saída, o que pode significar custos elevados em alguns casos.

Segundo Hoban *et al.* [1991], as maiores vantagens da simulação são a sua capacidade de reproduzir o mesmo tráfego em diferentes rodovias e a possibilidade de serem feitas mudanças controladas no tráfego que está sendo observado em uma dada rodovia.

2.3.2 Modelos para simulação de tráfego

Uma análise matemática convencional não é adequada ao estudo do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples, devido à forma aleatória com que ocorrem os eventos relacionados com o movimento dos veículos trafegando nessa rodovia. Essa aleatoriedade está relacionada tanto com as características mecânicas e físicas dos veículos, como com as características de comportamento dos motoristas e geométricas da rodovia [McLean, 1989].

Os elementos que caracterizam o fluxo de tráfego em uma rodovia de pista simples devem ser estudados simultaneamente, de modo que possa ser previsto o provável movimento dos veículos, levando-se em conta as condições da corrente de tráfego e o efeito da geometria da via. A realização desse estudo pode ser feita através de modelos matemáticos, embora não sejam de fácil resolução. Outra possibilidade é o uso de modelos de simulação.

De acordo com McLean [1989], os primeiros modelos de simulação empregados na pesquisa de tráfego estavam relacionados com a análise do comportamento do fluxo em interseções. Em seguida, os modelos foram empregados para analisar a operação em rampas nas *freeways*. Entretanto, os modelos para simulação de tráfego em vias rurais de duas faixas tiveram um desenvolvimento mais lento que os empregados em áreas urbanas ou *freeways*. O primeiro trabalho publicado sobre esse assunto é de 1964. O *Transport Research Ltd.* (ARRB) propôs o seu primeiro modelo para rodovias de pista simples em 1968, como parte integrante de um projeto sobre o fluxo e a capacidade, mas que foi abandonado em 1975 [McLean, 1989].

Um modelo de simulação procura representar o comportamento do tráfego através de uma série de valores numéricos e códigos computacionais. Para isso, ele deve incluir, segundo McLean [1989]:

- Uma consideração explícita das características aleatórias e determinísticas para cada unidade veículo/motorista simulada;
- Um método de atribuição dessas características aos veículos de tal modo que tais distribuições correspondam às do tráfego real;
- Um conjunto de regras de decisões lógicas representando as decisões dos motoristas e as restrições físicas da via;
- Um procedimento de processamento do tempo de simulação e a posição correspondente ao estado de cada veículo (*scanning*);
- Um sistema para armazenamento e substituição dos valores numéricos correspondentes a cada veículo (*book-keeping*);
- Rotinas de observação para registrar os dados de tráfego que irão fornecer a saída do programa de simulação.

Os modelos para simulação de tráfego podem ser classificados em:

Macroscópicos: os que consideram o comportamento do tráfego como um todo. Entre eles pode-se listar, segundo Yang [1997]: FREFLO, NETVACI, KRONOS, AUTOS, METANET e METACOR.

Microscópicos: os que consideram o movimento e as interações individuais entre cada veículo na corrente de tráfego. Como exemplo de modelos microscópicos, Yang [1997] cita: INTRAS, FRESIM, NETSIM, CORSIM, THOREAU, FLEXSYT-II, AIMSUR, TWOPAS e TRARR.

Mesoscópicos: os que reúnem características tanto dos modelos macroscópicos quanto dos microscópicos – METROPOLIS, DYNASMART, DYNAMIT e INTEGRATION, segundo Yang [1997].

Alguns modelos de simulação são discutidos a seguir.

FREFLO

O FREFLO é um modelo macroscópico de simulação do tráfego em *freeways* baseado em analogias com o fluxo de fluidos, ou seja, o tráfego é representado de forma contínua [Rathi *et al.*, 1987].

DYNASMART

O DYNASMART é um modelo de simulação usado na avaliação de informações usadas no fornecimento de estratégias e medidas de controle de tráfego tanto em interseções

como em *freeways*. Ele é um modelo macroscópico que representa os veículos dentro de uma rede. Considerando que os modelos macroscópicos não fazem um acompanhamento individual dos veículos, o DYNASMART movimenta os veículos individualmente ou em grupos, mantendo desse modo um registro dos locais e do itinerário dos elementos individuais. Esse é o nível de representação citado como mesoscópico [Hu & Mahmassani, 1995].

INTEGRATION

O INTEGRATION, desenvolvido na década de 80 nas Universidades de Waterloo e Queen's, em cooperação com o Ministério dos Transportes de Ontário [Bacon *et al.*, 1994], é um modelo de simulação capaz de representar tanto *freeways* quanto interseções semaforizadas. Para tanto, o fluxo de tráfego é representado como uma série de veículos individuais, que segue as relações específicas de um fluxo de tráfego macroscópico, sendo esse modelo caracterizado como um modelo mesoscópico de simulação [Aerde, 1998].

NETSIM

O NETSIM é um programa escrito em Fortran, que simula o tráfego dos veículos dentro da rede viária urbana. Cada veículo na rede é tratado individualmente e identificado por categoria (automóvel, *carpool*, caminhão e ônibus) e tipo (existem 16 tipos de veículos com diferentes características, algumas relacionadas com o comportamento do motorista, que pode ser passivo ou agressivo). É possível simular e obter detalhes de um único veículo, ou então, observar a interação entre os veículos. Em geral, a maioria das condições observadas em um tráfego urbano podem ser descritas por esse modelo [Andrews *et al.*, 1987].

TRARR e TWOPAS

Os modelos de simulação de rodovias de pista simples mais utilizados são o TRARR e o TWOPAS. O TRARR, abreviação de *TRAffic on Rural Roads*, foi desenvolvido na Austrália pelo ARRB *Transport Research Ltd.* É um modelo microscópico e estocástico, que opera numa base de acompanhamento individual dos veículos, atualizando suas posições, segundo a segundo, simulando suas performances para 35 tipos diferentes de manobras e 18 tipos de veículos [Silveira, 1996].

O TWOPAS é um modelo microscópico e estocástico, escrito em linguagem FORTRAN, foi desenvolvido pelo *Midwest Research Institute* (MRI) para a simulação de tráfego em rodovias de pista simples. Inicialmente ele era conhecido como TWOWAF, abreviação de *TWO Way Flow*, capaz de simular as operações de tráfego em rodovias rurais, incluindo as zonas de ultrapassagens e de não-ultrapassagens, e também, os efeitos das curvas horizontais e verticais, rampas e distância de visibilidade. Essa versão do modelo foi usada para gerar os dados apresentados pela edição de 1985 do HCM. Após a publicação do HCM-1985, o MRI desenvolveu o modelo TWOPAS, adicionando ao TWOWAF a capacidade de simular faixas de ultrapassagem e de subida, e pequenas seções de quatro faixas de tráfego em rodovias de pista simples [Harwood *et al.*, 1999].

De acordo com Harwood *et al.* [1999], o *Institute of Transportation Studies* (ITS) da Universidade da Califórnia – Berkeley (UCB), em um trabalho para o Departamento de Transportes da Califórnia, desenvolveu uma interface, conhecida como UCBRURAL, para ser usada tanto pelo TRARR como pelo TWOPAS. Essa interface permite:

1. Fornecer dados de entrada sobre o volume e as características do tráfego, e sobre a geometria da rodovia;
2. Rodar tanto o TRARR como o TWOPAS; e
3. Dispor os resultados em um formato gráfico mais conveniente.

Apesar da facilidade oferecida aos usuários desses modelos, essa interface não envolveu qualquer mudança significativa em nenhum deles.

O modelo TRARR, usado neste trabalho, será descrito com maiores detalhes no próximo capítulo.

Capítulo 3

SIMULAÇÃO DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES PELO MODELO TRARR

O TRARR (abreviação de *TRAffic on Rural Roads*) é um modelo para simulação de rodovias de pista simples desenvolvido na Austrália no ARRB *Transport Research Ltd.* por Geoff Robinson entre 1978 e 1980 [Hoban *et al.*, 1991]. Escrito em FORTRAN, inicialmente só podia ser usado em computadores do tipo *mainframe*, mas, a partir de 1985, foi transferido para microcomputadores do tipo IBM-PC.

O TRARR é capaz de simular trechos rurais de rodovias de pista simples ao longo do qual não existem interseções – isto é, um trecho no qual os veículos só podem entrar e sair pelos pontos inicial e final. O modelo permite o estudo das alterações causadas no tráfego, tanto por modificações nas características geométricas (distância de visibilidade, inclinação das rampas e raios de curvas verticais) como na corrente de tráfego. Algumas características do tráfego observadas são o tempo de viagem, a velocidade média e o consumo de combustível dos veículos trafegando pela rodovia.

A sua última versão é a 4.0, de 1991, e seu desenvolvimento foi interrompido pelo ARRB desde 1997, quando foi recalibrado pela última vez por esse mesmo instituto. Apesar da falta de suporte dos seus criadores, o TRARR continua a ser usado no Canadá [Morrall, 1995], nos Estados Unidos [Silveira, 1996], além de outros países, como Finlândia [Enberg & Pursula, 1996], Holanda e Hungria [Botma & Fi, 1991].

3.1 Descrição do programa

O TRARR é um modelo de simulação microscópico e estocástico que pode simular um fluxo de tráfego ininterrupto em uma rodovia de pista simples, com ou sem faixas auxiliares [Botha *et al.*, 1993].

O modelo procura criar uma corrente de tráfego que se aproxime ao máximo da corrente real, com base nas características dos veículos, na composição da corrente de tráfego, no comportamento dos motoristas, nas regras para ultrapassagens etc. Esses dados são armazenados em arquivos específicos e podem ser alterados pelo usuário para refletir as características da via e do tráfego [Hoban *et al.*, 1991], os quais são:

- TRAF: especifica a composição do tráfego, volume, divisão direcional e velocidades desejadas, bem como o intervalo entre atualizações do tráfego e a duração da simulação.
- VEHS: especifica parâmetros veiculares e relativos ao comportamento dos motoristas para cada um dos 18 tipos de veículos disponíveis. Esses parâmetros incluem comprimento, potência e aceleração máximas, *headway* mínimo quando trafegando em pelotões, comportamento durante manobras de ultrapassagem etc. e determinam o comportamento do veículo durante a simulação.
- ROAD: fornece detalhes sobre as características geométricas da rodovia, tais como rampas, curvas, trechos de ultrapassagem proibida, distâncias de visibilidade, faixas adicionais etc.
- OBS: especifica as informações de saída desejadas e que são coletadas em pontos de observação estabelecidos ao longo do trecho simulado.

3.1.1 O processo de simulação do tráfego

Inicialmente, o programa faz a leitura dos arquivos de dados da rodovia e das características do tráfego. A seguir, a corrente de tráfego é gerada, de tal forma que cada veículo que entra no trecho simulado tem tipo determinado aleatoriamente, de modo a reproduzir as características observadas no tráfego real. A geração do tráfego é baseada na seleção aleatória de valores a partir das distribuições do tempo de chegada, das velocidades e dos tipos de veículos. Esse é o único aspecto aleatório do TRARR, uma vez que o comportamento dos veículos ao longo da rodovia simulada é completamente determinado pelas características dos veículos e dos motoristas [Hoban *et al.*, 1991].

A geração do tráfego utiliza uma zona de *warm-up* para representar o processo de entrada dos veículos no trecho de rodovia a ser simulado. As zonas de *warm-up* são comprimentos hipotéticos de via adicionados nos extremos da rodovia, conforme mostra-se na Figura 3.1. As zonas de *warm-up* servem para produzir os pelotões observados nas entradas do trecho, já que nenhum veículo pode mudar de faixa nesses trechos. Os

veículos são gerados de acordo com um processo de chegada aleatório nas entradas das zonas de *warm-up*, mas o estado de equilíbrio só é atingido pelos pelotões no instante em que os veículos chegam na entrada da seção simulada [McLean, 1989].

Figura 3.1: Representação das zonas de *warm-up* (mão inglesa) [McLean, 1989].

A simulação do movimento dos veículos dá-se por meio da determinação de sua progressão ao longo do segmento de rodovia estudado, em intervalos fixos tipicamente iguais a um segundo. A cada intervalo, o programa modifica a velocidade, aceleração, manobra e “estado” (livre, ultrapassando ou em pelotões) de cada veículo. As regras de decisão para ultrapassagens e outros tipos de manobras realizadas pelos veículos são determinadas pelas características dos veículos e dos motoristas fornecidas inicialmente no arquivo VEHS [Hoban *et al.*, 1991].

Os resultados da simulação são obtidos por meio do registro dos valores correspondentes aos parâmetros de saída quando os veículos passam pelos pontos de observação preestabelecidos no arquivo OBS. Ao final do tempo de simulação, o programa gera um arquivo com o resumo dos parâmetros do tráfego observados. A Figura 3.2 ilustra o processo de simulação usado no TRARR.

Figura 3.2: Etapas do modelo de simulação de rodovias TRARR

O TRARR é composto por subrotinas, algumas comuns a todas as versões e outras que variam de versão para versão [Robinson, 1980]. O programa inicia chamando a

subrotina SETRR para ler os dados de entrada e inicializar todas as constantes e *arrays*. A cada simulação, é necessário fornecer um valor do tempo de ajuste (*settling down* – *TSE*), que corresponde ao tempo que o sistema gasta para atingir o estado de equilíbrio, antes dos resultados da simulação começarem a ser armazenados pelo modelo. O temporizador do modelo é ajustado no mesmo valor de *TSE*, mas num valor negativo (por exemplo, se *TSE* for igual a trinta minutos, o relógio do modelo será ajustado para menos trinta minutos). [Hoban *et al.*, 1991].

Figura 3.3: Fluxograma do programa TRARR.

O programa principal atualiza os dados da simulação a cada intervalo de tempo estabelecido e chama as seguintes rotinas [Hoban *et al.*, 1991] (Figura 3.3):

- SETOB: inicia a simulação (o armazenamento dos resultados da simulação) quando o tempo estiver zerado.
- MANVR: determina o “estado” de cada veículo e considera as possíveis mudanças que possam ocorrer, dependendo de outros veículos ao redor.
- POSIT: atualiza a velocidade e a posição dos veículos.
- ENDS: gera novos veículos que chegam ao segmento simulado e apaga os veículos que estão saindo do segmento.
- REORD: atualiza as posições relativas dos veículos em cada faixa.
- LVOPP: atualiza a lista dos próximos veículos na corrente oposta que serão encontrados por cada veículo.
- OBS: registra os parâmetros dos veículos que passam pelos pontos de observação durante o incremento de tempo da simulação.
- FINAL: grava todos os resultados obtidos e termina o programa.

Os nomes das variáveis de cada um desses arquivos e os respectivos significados estão listados no Anexo A e exemplos dos arquivos TRAF, VEHS, ROAD e OBS podem ser vistos no Anexo B.

3.2 Inicializando o TRARR

O TRARR é um programa para o sistema operacional MS-DOS e, dentro do ambiente Microsoft *Windows*[®], roda numa janela do MS-DOS ou no modo DOS. Pode-se inicializar o TRARR através do DOS ou diretamente do Microsoft *Windows*[®]. Pelo DOS, deve-se entrar no diretório onde está gravado o programa e digitar “T4”. Pelo Microsoft *Windows*[®], com o *mouse*, dar dois cliques no “T4.exe”. Feito isso, o menu de controle do TRARR estará aberto. Neste menu, há as seguintes opções:

- ROAD: Cria ou modifica o arquivo com dados sobre o trecho de rodovia que vai ser simulado.
- TRAFFIC: Cria ou modifica o arquivo que contém os dados sobre o tráfego que será observado na simulação.
- EXECUTE: Roda o programa TRARR.
- OUTPUT: Exibe os resultados da simulação na tela do computador.

- MAINTENANCE: Esta opção permite renomear alguns arquivos de saída e apagar alguns arquivos de entrada, sem a necessidade sair do programa.
- INTRO: Fornece informações sobre o programa (*Help*) para o usuário.
- QUIT: Sai do programa e vai para o DOS.

3.2.1 Executando uma simulação

Como mencionado no item anterior, uma simulação pode ser executada de duas maneiras: a partir do menu de controle ou a partir do MS-DOS. Adotando-se qualquer uma dessas opções, o programa será inicializado e o seu menu de controle estará aberto. Dentro do menu de controle, na opção EXECUTE, selecionar os arquivos da rodovia (extensão .rod) e do tráfego (extensão .trf) que serão simulados e assim executar a simulação.

Uma outra forma possível de se executar uma simulação é, diretamente do diretório do MS-DOS onde está instalado o programa, digitar “TRARR”. A diferença entre essa forma de execução da simulação e as anteriores é que nesta maneira não há a possibilidade de selecionar os arquivos que serão usados, pois o programa selecionará automaticamente os arquivos ROAD e TRAF usados na última simulação realizada.

Uma vez iniciada a simulação, o programa irá exibir algumas mensagens no monitor para que o progresso da simulação seja acompanhado. Um resumo dos resultados pode ser exibido no formato de gráficos no monitor, mas informações detalhadas são armazenadas no arquivo OUT [Hoban *et al.*, 1991].

3.2.2 Mudanças nos parâmetros de entrada

O TRARR possui parâmetros de entrada que podem ser modificados pelo usuário para representar um novo cenário que será simulado e também para a recalibração do modelo. Essas modificações podem ser feitas nos arquivos TRAF, VEHS, ROAD e OBS. As principais alterações são feitas no volume e na divisão direcional do tráfego, porcentagem de caminhões, formação de pelotões, tempo de simulação e o tempo de *settling down* [Hoban *et al.*, 1991].

- TRAF: pode-se mudar o valor da velocidade do fluxo de tráfego e as opções de execução (através dos parâmetros IOPT).
- VEHS: nesse arquivo pode-se mudar as características mecânicas dos veículos e comportamental dos motoristas.

- ROAD: as mudanças feitas nesse arquivo são, principalmente, nas características geométricas do trecho de rodovia a ser simulado, como a distância de visibilidade e faixas de ultrapassagem.
- OBS: as mudanças nesse arquivo são relacionadas com a localização dos pontos de observação e do tipo de informação que será fornecida no arquivo de saída de dados.

3.3 Interpretando os resultados da simulação

Os resultados obtidos a cada simulação são armazenados no arquivo OUT e incluem, dentre outros, o tempo de viagem, a velocidade dos veículos e o consumo de combustível. A simulação fornece a média e o desvio padrão dos tempos de viagem (TT) para cada dois pontos que são especificados pelo usuário no arquivo OBS. Esse resultado pode ser usado para calcular os benefícios provenientes da diminuição do tempo de viagem causado por possíveis melhorias na rodovia, por exemplo [Hoban *et al.* 1991].

A velocidade média de viagem (V_j) é calculada a partir do tempo de viagem (TT , em segundos) sobre uma dada distância (L , em km) usando:

$$V_j = \frac{3600.L}{TT} \quad (3.1)$$

Esta velocidade média serviria de estimativa da velocidade de operação na rodovia, de acordo com a definição de velocidade operacional do HCM [TRB, 1985].

O programa fornece também o número de veículos ultrapassados em cada categoria, bem como a taxa de ultrapassagens, que é obtida através da relação entre o número de veículos ultrapassados pelo número total de veículos na corrente e pela extensão do trecho simulado. Esta medida de desempenho é útil para observar as mudanças no comportamento do tráfego devido a modificações em algum trecho de rodovia, como por exemplo, a construção de uma faixa de ultrapassagem.

O tempo dispendido viajando em pelotões que, segundo o HCM – 2000 [Harwood *et al.*, 1999] corresponde à porcentagem média do tempo de viagem em que os veículos, em um dado segmento de rodovia, devem viajar em pelotões atrás de veículos mais lentos devido a impossibilidade de ultrapassar, durante determinado intervalo de tempo, é um importante parâmetro de medida da qualidade do fluxo de tráfego [Hoban *apud* Hoban *et al.* 1991]. Além disso, a porcentagem de tempo gasto em pelotões representa a liberdade de manobra e o conforto e a conveniência de viagem em uma rodovia

de pista simples, que são aspectos importantes do conceito de nível de serviço [Harwood *et al.*, 1999].

A velocidade instantânea e o número de veículos seguindo em pelotões, ou seja, aqueles veículos que viajam com *headways* menores que 5 segundos [TRB, 1985] também são fornecidos pelo modelo. Estes resultados são úteis para observar variações no desempenho do tráfego e identificar problemas ou avaliar o efeito de possíveis melhorias em pontos específicos ao longo da rodovia.

3.4 Limitações do modelo

Alguns aspectos relacionados com os veículos e motoristas não são bem modelados pelo TRARR. Hoban *et al.* [1991] sugerem que essas restrições, citadas a seguir, sejam observadas para que haja uma aplicação adequada do modelo.

- O comportamento do motorista não varia com a intensidade do tráfego, exceto quando a distância entre os veículos viajando em pelotões varia, variando também o tempo que esse motorista gasta para realizar uma ultrapassagem;
- A potência máxima dos veículos é quase sempre usada desnecessariamente pelo modelo, ou seja, é usada em situações em que uma potência menor que a máxima seria suficiente para representar adequadamente o desempenho do veículo;
- O fluxo de tráfego é considerado constante ao longo do tempo;
- Congestionamentos ('gargalos') como os causados por acidentes, não podem ser modelados;
- Para um veículo em pelotão, somente a velocidade e a posição do veículo em frente são levadas em consideração;
- A rodovia é dividida em unidades discretas, em geral de 100 em 100 metros, o que pode causar uma representação inadequada da rodovia simulada;
- A modelagem do desempenho dos veículos não é precisa. Mudanças de marcha e resistência ao rolamento não são consideradas;
- O tempo requerido para a mudança de faixa não é considerado.

3.5 Uso do TRARR para a simulação de rodovias de pista simples paulistas

A disponibilidade do modelo de simulação TRARR no Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos e a facilidade de contatos com o professor John

Morrall da Universidade de Calgary, no Canadá, foram fatores importantes na decisão de usá-lo nesta pesquisa. Após o início dos trabalhos, o modelo TWOPAS foi adquirido pelo Departamento de Transportes, entretanto, não se teve acesso aos manuais deste modelo, o que dificultou o seu uso. Além disso, apesar do TRARR possuir os manuais de instruções, o ARRB *Transport Research Ltd.*, onde o modelo foi desenvolvido, não fornecia suporte aos seus usuários. O professor Morrall, através de sua experiência prática na utilização do TRARR em projetos no Canadá e Estados Unidos, forneceu o suporte necessário com relação a dúvidas sobre este modelo.

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método de pesquisa adotado neste trabalho para a recalibração do modelo será descrito neste capítulo, desde a coleta dos dados, incluindo os locais escolhidos e os equipamentos utilizados, até a organização dos dados. Esta é uma etapa trabalhosa e importante da pesquisa, já que é a partir dos dados coletados que os processos de recalibração e validação do modelo serão executados.

4.1 O processo de recalibração

O TRARR já foi recalibrado no Canadá, pelo grupo liderado pelo Prof. John Morrall, da Universidade de Calgary; nos EUA, pelo grupo do Prof. Adolph May, da Universidade da Califórnia - Berkeley [Silveira, 1996]; e, mais recentemente, na Austrália, pelo ARRB *Transport Research* [Botterill, 1997]. O modelo TRARR pode ser recalibrado modificando-se parâmetros comportamentais dos motoristas e de desempenho dos veículos, que ficam armazenados no arquivo VEHS.

Botterill [1997], discutindo o processo de recalibração do TRARR, concluiu que as variáveis mais importantes são as que determinam a velocidade média da corrente de tráfego pois, em situações em que a via está congestionada, os veículos mais lentos determinam a velocidade média (por ocasionarem a formação de pelotões) ao passo que, em situações de tráfego descongestionado, os veículos mais velozes causam um maior impacto na velocidade média, por serem capazes de ultrapassar os mais lentos. Botterill concluiu também que as variáveis comportamentais são menos importantes, pois atuam apenas no início e no final das manobras de ultrapassagem.

Silveira [1996], em um estudo realizado pelo *Institute of Transportation Studies* da UC-Berkeley, relatou que a calibração do modelo pode ser feita através da comparação dos perfis de velocidade estimados pelo TRARR e os observados em campo.

Neste estudo, o processo de recalibração estará concluído assim que as comparações entre os valores observados e os previstos nas simulações não apresentarem diferenças muito acentuadas. Entretanto, é difícil fixar um intervalo exato para essas diferenças (por exemplo, $\pm 5\%$), já que nos trabalhos pesquisados esse valor variou bastante. No estudo realizado por Archilla & Morrall [1995], o modelo foi considerado recalibrado quando as diferenças para a velocidade média dos veículos variavam entre $-0,4\%$ até $8,9\%$, com as diferenças para o desvio padrão das velocidades variando entre $16,2\%$ e $18,6\%$. Por outro lado, as diferenças relativas à porcentagem de veículos em pelotões tiveram uma variação muito menor, entre $-1,1\%$ e $5,3\%$.

No estudo realizado por Enberg & Pursula [1996] na Finlândia, as características do fluxo de tráfego em um trecho experimental de 20 km de extensão de uma rodovia de três faixas (rodovia com uma faixa específica para ultrapassagens) foram estudadas. Foram realizados levantamentos de dados e simulações para as situações antes e depois da construção da faixa adicional. Os resultados de ambos os estudos foram também comparados, mas nesse caso, não foram apresentados valores em porcentagem, mas absolutos. Por exemplo, para a velocidade instantânea, as diferenças variavam entre 0 e 25 km/h. Uma outra forma de comparar dois resultados é através de gráficos, como feito por Wolluter & Polus [1988] e Botha *et al.* [1993].

4.2 Método escolhido

A recalibração do TRARR deve ser feita através de atualizações nos arquivos de entrada que, para esses propósitos, podem ser divididos em duas categorias:

1. Os arquivos que devem se alterar a cada simulação para refletir características locais do trecho estudado:
 - TRAF: dados do tráfego e para geração de veículos;
 - ROAD: dados da geometria da via e faixas de tráfego;
 - OBS: pontos para coleta de dados sobre as medidas de desempenho.
2. Os arquivos que refletem características regionais ou nacionais e que normalmente não se alteram de estudo para estudo:

- VEHS: características comportamentais dos motoristas e de desempenho dos veículos;
- MULTIP: tabela de multiplicadores de velocidade (*speed multipliers table*), que reflete a relação entre a geometria da rodovia e a velocidade.

Numa recalibração do TRARR, os dois últimos arquivos é que normalmente são modificados. Na recalibração realizada, apenas o arquivo VEHS foi modificado e nele, os dados relativos ao desempenho dos caminhões e de comportamento dos motoristas dos automóveis foram alterados. O processo foi conduzido a partir de comparações com dados referentes a trechos de rodovias, em que as variáveis foram alteradas de tal forma que os resultados da simulação fossem compatíveis com as observações de campo.

4.3 Coleta de dados

As coletas dos dados necessários tanto na calibração quanto na validação do modelo foram realizadas na SP255 (Rodovia Antônio Machado Sant'anna), rodovia de pista simples administrada pela empresa Autovias S/A, sob regime de concessão. O trecho escolhido para a realização das coletas de dados está localizado entre as cidades de Araraquara e Ribeirão Preto (Figura 4.1), entre os quilômetros 31,0 e 41,0. A diferença entre os trechos estudados na recalibração e validação do modelo está nas suas extensões: na recalibração, o trecho estudado possuía 2,8 km (localizado entre os quilômetros 31,0 e 33,8) e para a validação do modelo, o trecho estudado possuía 10 km (localizado entre os quilômetros 31,0 e 41,0). Os dados coletados foram os relativos ao fluxo de tráfego, à geometria da via e à sinalização horizontal.

O local escolhido para a coleta de dados que foram usados na recalibração do modelo é um trecho tangente, situado entre os quilômetros 31,0 e 33,8, como pode ser visto no esquema da Figura 4.2. O perfil vertical, esquematizado na Figura 4.2, possui, no sentido Ribeirão Preto-Araraquara, um declive com -3,13%, seguido de um segmento com -1,79% de inclinação e por fim, um aclave de 3,94%. Com pode ser visto na Figura 4.2, há uma rampa de 4,73% de inclinação e corresponde ao trecho que foi adicionado ao segmento de rodovia simulado para que o seu comprimento total fosse pelo menos igual a 2 km (mínimo exigido pelo TRARR). Um talude de corte no início do trecho permitiu a colocação das câmeras filmadoras em local seguro e não visível aos motoristas. Tomou-se o cuidado de estacionar o veículo usado no transporte da equipe

de coleta em local onde não fosse facilmente notado e para que não causasse interferência no comportamento dos motoristas.

Figura 4.1: Indicação da localização da rodovia SP255.

Figura 4.2: Esquema do trecho da SP255 onde foi realizada a coleta de dados.

4.3.1 Equipamentos utilizados

Para a recalibração do modelo de simulação são necessários dados que servirão para estabelecimento de parâmetros de entrada do TRARR; para a validação, é também necessário um outro conjunto de dados que deve ser comparado aos resultados da simulação. Optou-se por utilizar videocâmaras e sensores automáticos para a coleta desses dados.

Figura 4.3: Local da coleta na rodovia SP255.

Sensores para coleta automática de dados

O uso de sensores para coleta automática de dados tem sido relatado em diversos estudos, como por exemplo, Botma & Fi [1991] e Wollhuter & Polus [1988]. Os sensores para coleta automática de dados (Figura 4.4) utilizados nesta pesquisa são equipamentos portáteis e programáveis fabricados pela *Nu-Metrics Inc.* A tecnologia empregada é a VMI - *Vehicle Magnetic Imaging*, que utiliza a distorção do campo magnético da Terra para detectar, contar e classificar os veículos que passam sobre ele [Nu-Metrics, 1997].

Figura 4.4: Sensor NC-97 para coleta automática de dados.

Figura 4.5: Instalação do sensor NC-97 na faixa de tráfego.

Uma inconveniência deste tipo de equipamento é a necessidade de se instalar o sensor no centro de cada faixa de tráfego (Figura 4.5). Quando o veículo passa pelo sensor, sua velocidade, comprimento e o instante de passagem são registrados pelo equipamento. Ao final de cada estudo, estes dados são recuperados através de um programa

específico e, em seguida, transferidos para um computador em forma de planilha eletrônica.

O sensor NC-97 deve ser programado a cada estudo e para isso, usa-se o programa LP (versão 5.11e). O sensor possui três modos para coleta de dados: *frame*, *sequential* e o *verify*. As diferenças entre estes três modos reside na forma como os dados dos veículos (velocidade, comprimento e instante de passagem) são armazenados no sensor. No modo *frame* os dados são coletados a intervalos de tempo predefinidos pelo usuário, por exemplo, a cada 5 minutos. O sensor conta os veículos que passam em cada intervalo, classificando-os de acordo com seu comprimento e velocidade. Até 8 grupos (*bins*) de comprimento podem ser definidos pelo usuário. Para a velocidade, podem ser definidos até 15 grupos.

No modo *sequential*, o comprimento, velocidade e instante de passagem de cada veículo são armazenados sequencialmente, para todos os veículos detectados pelo sensor. Ao contrário do modo *frame*, o modo *sequential* não exige suposições a respeito da categorização dos veículos em termos do comprimento e da velocidade. Por outro lado, como são armazenados mais dados sobre os veículos, a duração dos estudos no modo *sequential* é sempre menor que no modo *frame*. Nas coletas de dados realizadas nesta pesquisa, o modo usado foi o *sequential*, por possibilitar uma melhor caracterização do tráfego.

O modo *verify* permite que os dados coletados sejam visualizados on-line, bastando que o rádio receptor esteja conectado a um microcomputador. Os dados de cada veículo são transmitidos para o computador assim que ele passa pelo sensor e podem ser armazenados no microcomputador.

Para a recuperação dos dados armazenados nos sensores, utiliza-se o programa LP para leitura dos dados dos sensores e o programa SEQSS para a transferência destes dados para o formato de planilha eletrônica, o que facilita a sua análise e manipulação.

Vídeocâmaras

Juntamente com o uso dos sensores para coleta automática de dados, foram usadas câmeras de vídeo VHS C. O uso de videocâmaras é bastante comum em estudos para a análise do tráfego, cujo comportamento é muito variável. Mesmo que coletas sejam realizadas em um mesmo local, num mesmo dia e horário da semana, os dados obtidos nunca serão iguais. Por isso, com a ajuda de um vídeo, é possível ver e rever a corrente

de tráfego várias vezes, podendo obter dele todos os dados necessários. Esse tipo de método de coleta foi utilizado, por exemplo, por Enberg & Pursula [1991] e também por Morrall *et al.* [1995].

Figura 4.6: Uso de videocâmara na SP255.

Para esse estudo estavam disponíveis três câmeras filmadoras, que foram colocadas sobre o tripé para as filmagens (Figura 4.6). Cada câmera tinha autonomia para aproximadamente 90 minutos de filmagem no modo mais lento (EP), dependendo da capacidade de carga da bateria.

4.3.2 Procedimentos de coleta de dados

Na preparação dos arquivos de entrada de dados do modelo, os parâmetros que deverão ter os seus valores modificados são os que se referem:

- À geometria da rodovia (perfil vertical e horizontal);
- À composição do tráfego (porcentagem de veículos de cada tipo);
- Ao volume de tráfego (número de veículos por hora);
- À porcentagem de veículos em pelotões e
- À velocidade média.

O critério de escolha do local para a coleta dos dados levou em conta esses dados e também os que seriam comparados com os resultados das simulações. Buscou-se um local onde as manobras de ultrapassagem fossem permitidas e que tivessem, pelo menos, um trecho plano e uma rampa, necessária para verificar a formação de pelotões.

Esses pelotões são geralmente liderados por caminhões que perdem velocidade ao longo da rampa, causando a formação das filas.

No local da coleta de dados foram marcados pontos espaçados de 100 m, a partir dos quais foram feitas as estimativas das velocidades com os dados da filmagem. Para a determinação desses pontos, uma pessoa, posicionada no ponto, fazia um sinal (um reflexo com um espelho) em direção à câmera e a pessoa cuidando da filmagem certificava-se de que esse sinal era visível. Posteriormente, no momento de extrair os dados da fita, os pontos puderam ser marcados na própria tela da televisão, delimitando um trecho de comprimento conhecido. Após a determinação desses pontos, o próximo passo foi estimar a velocidade, obtida a partir do tempo que cada veículo gastou para percorrer o trecho inicialmente delimitado.

O número de ultrapassagens e a porcentagem de veículos em pelotões foram também levantados entre os pontos marcados. O critério adotado para que um veículo fosse considerado em pelotão é o *headway* ser menor que 5 segundos.

Os dados coletados pelos sensores NC-97 (instante de passagem, a velocidade instantânea e o comprimento de cada veículo) também foram usados no levantamento do volume de tráfego e da porcentagem de veículos em pelotões. O volume é obtido diretamente do número de veículos detectados. O *headway* (na realidade, o *gap*) entre os veículos é medido a partir dos instantes de passagem e, a partir daí, a quantidade de veículos em pelotões é estimada.

O trecho escolhido para a coleta foi dividido em três partes: A, B e C, no sentido Ribeirão Preto–Araraquara (os sentidos de tráfego Ribeirão Preto–Araraquara e Araraquara–Ribeirão Preto foram denominados, respectivamente, N-S e S-N) (Figura 4.7). O trecho A é a rampa de $-3,13\%$ de inclinação. O trecho B é o que possui uma rampa bem suave, quase plano, com $-1,79\%$ de inclinação. O trecho C é a rampa de $3,94\%$ e onde foram instalados os sensores NC-97.

4.3.3 Análise dos dados

A composição do tráfego foi obtida a partir dos filmes e dos arquivos de dados dos sensores NC-97. A classificação dos veículos foi feita de acordo com os seguintes tipos:

1. Carro: automóveis;
2. Utilitário: caminhonetes e vans;

Figura 4.7: Esquema para coleta de dados de velocidade.

3. Caminhão rígido pesado: caminhão unitário de 3 eixos com qualquer tipo de carroceria;
4. Caminhão rígido leve: caminhão unitário de 2 eixos com qualquer tipo de carroceria;
5. Ônibus;
6. Motos e
7. Caminhão articulado: caminhão do tipo cavalo mecânico e semi-reboque.

A Tabela 4.1 apresenta a configuração segundo a qual os caminhões observados foram classificados.

Tabela 4.1: Tipos de caminhões observados.

<i>Caminhões</i>	<i>Configuração típica</i>
Rígido pesado
Rígido leve
Articulado

Inicialmente foi feita a contagem dos veículos e o levantamento da composição da corrente de tráfego. Além do filme, os dados dos arquivos dos sensores NC-97 fo-

ram usados para fazer a classificação dos veículos. Essa classificação foi feita em função do comprimento dos veículos segundo medidas mostradas na Tabela 4.2.

A Figura 4.8 mostra a corrente de tráfego dividida em três subtipos, na qual todos os caminhões foram agrupados sob a denominação de “caminhões” e os ônibus e as motos, sob a denominação de “outros”. Observa-se que os carros representam mais da metade dos veículos na corrente, em ambos os sentidos (65,6% no sentido N-S e 53,3% no sentido S-N), e que o fluxo não está igualmente dividido entre as duas faixas de tráfego: o fluxo no sentido N-S é 58,7% do total e o fluxo no sentido S-N representa 41,3% do volume bidirecional.

Tabela 4.2: Classificação dos veículos em função do comprimento.

<i>Categorias</i>	<i>Comprimento (m)</i>
Carro	3,0
Utilitário	3,0 à 4,9
Rígido pesado	8,1 à 10,0
Rígido leve	5,0 à 8,0
Ônibus	10,1 à 12,0
Articulado	> 12,0

Figura 4.8: Composição da corrente de tráfego na SP 255.

Assim, dessa análise pode-se observar que a grande maioria de veículos que circula naquela rodovia, em ambos os sentidos, é representada por automóveis, representando praticamente 50% do volume total, seguido dos caminhões rígidos de 3 eixos, que representam quase 20%. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Frequência e frequência acumulada dos tipos de veículos.

Tipos de veículos	Volume (veíc/h)		Frequência (%)		Frequência Acumulada (%)	
	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
Carro	132	64	51,56	35,56	51,56	35,56
Utilitário	36	32	14,06	17,78	65,63	53,33
Rígido pesado	32	40	12,50	22,22	78,13	75,56
Rígido leve	32	16	12,50	8,89	90,63	84,44
Ônibus	0	4	0,00	2,22	90,63	86,67
Moto	0	12	0,00	6,67	90,63	93,33
Articulado	24	12	9,38	6,67	100,00	100,00
Total	256	180	100,00	100,00		

A Figura 4.9 mostra a composição do fluxo de tráfego na rodovia SP255, em que se pode observar que o fluxo nos dois sentidos de tráfego não é equilibrado. O tipo “carro” é predominante, com uma porcentagem ligeiramente maior no sentido N-S (51,56% contra 35,56%). Logo depois aparecem os caminhões rígidos pesados, com aproximadamente 20% do volume total, seguidos pelos utilitários, com aproximadamente 15%. Os caminhões rígidos leves têm uma participação de 10%; motos, 7% e os ônibus, 2,2%. Os caminhões articulados apresentaram porcentagens com valores próximos, sendo 9,38% no sentido N-S e 6,67% no sentido S-N.

Figura 4.9: Composição direcional do fluxo de tráfego na SP255.

Os veículos utilitários podem ser classificados em utilitários pesados, que inclui as caminhonetes (F-1000, D-20 etc), e utilitários leves (Saveiro, Pampa, Courier, Fiorino etc). Na classificação usada neste trabalho, foram incluídos nesse grupo tanto os utilitários leves quanto os pesados, e as vans (Kombi, Besta etc). A Tabela 4.4 mostra a fre-

quência de cada tipo de veículo utilitário observado, da qual pode-se notar que o tipo mais comum é as caminhonetes.

Tabela 4.4: Tipos de veículos utilitários.

<i>Tipo</i>	<i>Quantidade</i>		<i>Frequência (%)</i>	
	<i>N-S</i>	<i>S-N</i>	<i>N-S</i>	<i>S-N</i>
Utilitário leve	11	6	28,94	16,67
Utilitário pesado	23	21	60,53	58,33
Vans	4	9	10,53	25,00
<i>Total</i>	38	36	100	100

Dentro do tipo “carro”, os automóveis foram separados por marca e modelo (por exemplo: Gol, Palio, entre outros). Os tipos de veículos que foram observados no trecho estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Tipos de automóveis observados.

<i>Tipos</i>	<i>Sentido N-S</i>		<i>Sentido S-N</i>	
	<i>Quantidade</i>	<i>Frequência (%)</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Frequência (%)</i>
Belina	1	6,25	0	0,00
Caravan	0	0,00	1	2,94
Corsa	0	0,00	3	8,82
Escort	2	12,50	2	5,88
Fiesta	0	0,00	1	2,94
Fusca	1	6,25	1	2,94
Gol	7	43,75	13	38,24
Golf	1	6,25	2	5,88
Kadett	0	0,00	2	5,88
Marea	1	6,25	0	0,00
Monza	2	12,50	3	8,82
Palio	0	0,00	1	2,94
Polo	0	0,00	1	2,94
Santana	1	6,25	0	0,00
Tempra	0	0,00	1	2,94
Uno	0	0,00	1	2,94
Vectra	0	0,00	2	5,88
<i>Total</i>	16	100,00	34	100,00

As velocidades dos veículos foram estimadas a partir de fitas de vídeo, usando-se os pontos marcados no local. Com a ajuda de um filme plástico transparente colocado na tela da televisão, foram obtidos os tempos de viagem dos veículos no trecho. Como a distância entre os pontos é conhecida, a estimativa da velocidade é feita a partir do tempo gasto para percorrer tal distância:

$$V_i = \frac{L}{t_i} \quad (4.1)$$

sendo: V_i : velocidade do i -ésimo veículo (m/s);

L : comprimento do trecho(m) e

t_i : tempo gasto para percorrer o trecho L (s).

Levantando-se as velocidades dessa forma, obteve-se a distribuição de velocidades dos veículos divididos por categorias (automóveis, caminhões rígidos e caminhões articulados) apresentada nas Figuras 4.10 e 4.11. Observa-se no sentido N-S que apenas 2,2% dos veículos têm velocidade menor que 50 km/h e que 11,2% dos veículos estão trafegando com velocidade superior a 115 km/h. No sentido S-N, 1,0% dos veículos estão trafegando com velocidades abaixo de 50 km/h e 3,4% dos veículos estão com velocidade acima de 115 km/h.

Entretanto, no sentido N-S, os veículos apresentam um equilíbrio com relação à velocidade média (91,9 km/h para os automóveis; 95,7 km/h para os caminhões rígidos e 95,4 km/h para os caminhões articulados). No outro sentido de tráfego ocorre maior variação das velocidades, principalmente dos veículos pesados (88,3 km/h para os caminhões rígidos e 86,5 km/h para os caminhões articulados), menores que as velocidades dos automóveis (91,8 km/h) naquela faixa e menor também que as velocidades desses mesmos veículos na faixa oposta.

Na Tabela 4.6, serão apresentados os dados sobre o estado dos veículos (livres ou seguindo em pelotões) na corrente de tráfego nos trechos A, B e C, também obtidos da filmagem, onde cada trecho foi monitorado por uma câmera de vídeo posicionada em local estratégico, de forma a abranger com a maior nitidez possível os veículos trafegando na rodovia.

Figura 4.10: Distribuição de velocidades no sentido N-S.

Figura 4.11: Distribuição de velocidades no sentido S-N.

Pode-se notar, pelos dados apresentados na Tabela 4.6, que a quantidade de veículos observados para o trecho B é bem menor que o observado para os outros trechos. Devido a uma falha na coleta dos dados, o tempo de filmagem daquele trecho ficou muito reduzido com relação aos demais.

Tabela 4.6: Estado dos veículos na corrente de tráfego na SP255.

Trecho	Sentido	Total de Veículos	Veículos livres		Veículos em pelotão	
			Quantidade	Porcentagem	Quantidade	Porcentagem
A	N-S	231	169	73,16	62	26,84
	S-N	231	129	55,84	102	44,16
B	N-S	43	12	27,91	31	72,09
	S-N	67	33	49,25	34	50,75
C	N-S	215	157	73,02	58	26,98
	S-N	228	120	52,63	108	47,37

Os dados obtidos pelos sensores NC-97, relativos ao estado dos veículos na corrente de tráfego estão apresentados na Tabela 4.7. Os dados obtidos pela observação do filme e pelos sensores NC-97 foram comparados. Desse modo, um resumo dos resultados desta comparação é apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.7: Dados coletados com os sensores NC-97.

Sentido	Total de veículos	Livres	Pelotão	% Livre	% Pelotão	Tempo de coleta
N-S	510	375	135	73,53	26,27	2:29:11
S-N	507	258	249	50,89	49,11	2:29:32

Tabela 4.8: Comparação dos dados obtidos pela filmagem e pelos sensores NC-97.

Parâmetro	Sentido N-S			Sentido S-N		
	Filmagem	NC-97	Δ (%)	Filmagem	NC-97	Δ (%)
Número de veículos	215	220	-2,32	228	235	-3,07
Velocidade média ⁽¹⁾	94	94,25	-0,27	88	88,95	-1,08

Obs.: (1) A velocidade média é somente dos veículos observados e medida em km/h.

Os dados relativos às ultrapassagens foram obtidos da filmagem do trecho. Estes dados incluem o número de manobras de ultrapassagem e os tipos de veículos envolvidos em tais manobras, divididos em duas situações: o veículo ultrapassador (o que realiza a ultrapassagem) e o veículo ultrapassado. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 4.9.

Pelos dados apresentados na Tabela 4.9, nota-se que a maior parte das manobras de ultrapassagens são realizadas pelos automóveis (80% no sentido S-N e 67% no N-S), o que não acontece com relação aos veículos ultrapassados, em que não há predominância de nenhum tipo de veículo.

Tabela 4.9: Número de manobras de ultrapassagem.

<i>Tipo</i>	<i>Sentido S-N</i>		<i>Sentido N-S</i>	
	<i>Ultrapassador</i>	<i>Ultrapassado</i>	<i>Ultrapassador</i>	<i>Ultrapassado</i>
Carro	16 (80%)	5	8 (67%)	3
Utilitário	1 (5%)	0	3 (25%)	1
Rígido pesado	1 (5%)	6	0 (0%)	6
Rígido leve	0 (0%)	4	1 (8%)	2
Ônibus	0 (0%)	2	0 (0%)	0
Moto	1 (5%)	0	0 (0%)	0
Articulado	1 (5%)	3	0 (0%)	0
<i>Total</i>	20	20	12	12

4.4 Parâmetros recalibrados

A recalibração do TRARR consiste em produzir um novo arquivo de parâmetros veiculares que seja representativo dos veículos comumente observados no Brasil. Os parâmetros do arquivo VEHS escolhidos para a recalibração do modelo estão mostrados na Tabela 4.10, assim como as suas respectivas definições.

Tabela 4.10: Parâmetros para recalibração do modelo.

<i>Parâmetro</i>	<i>Definição</i>
VFCF	Massa do veículo
VLN	Comprimento do veículo
VNP	Máxima relação potência/massa usada em situação normal
VXP	Máxima relação potência/massa usada em ultrapassagens
LIF	Descritor da velocidade desejada
VHSFN	<i>Happy speed factor</i> para trechos sem faixas adicionais

Os valores dos parâmetros correspondentes à relação potência/massa foram obtidos de um estudo prévio, que analisava a distribuição das massas de caminhões numa balança da Rodovia Anhanguera [Demarchi & Setti, 1999]. Os valores adotados para o parâmetro *VNP*, a relação potência/massa máxima usada em situação normal, corresponde à encontrada para o 85º percentil da distribuição de pesos dos caminhões da classe. Os valores adotados para o parâmetro *VXP*, a relação potência/massa máxima usada em ultrapassagens, corresponde à encontrada para o 15º percentil da distribuição dos pesos.

Na simulação, cada veículo – ou, mais apropriadamente, cada motorista – possui uma velocidade desejada básica (*basic desired speed*), na qual ele irá viajar se não estiver sujeito a restrições de velocidade causadas por outros veículos ou pela geometria da via.

O parâmetro *LIF*, definido no arquivo VEHS, estipula a velocidade básica desejada a partir do tipo da categoria do veículo. Este parâmetro varia entre 1 e 4, sendo que 1 representa os caminhões articulados; 2, os caminhões rígidos; 3 os automóveis; e 4, os automóveis velozes. Os efeitos da geometria da via na redução da velocidade são representados por uma combinação do parâmetro *LIF* e do *road speed index*. O *road speed index* é definido no arquivo ROAD, em função do raio das curvas horizontais, e varia, no arquivo MULTIP usado nesta recalibração, entre 0,429 e 1,159. A velocidade básica desejada num certo trecho é dada pelo produto entre a velocidade básica da classe veicular (determinada pelo parâmetro *LIF*) e o *road speed index* do trecho.

O processo de decisão para realizar uma ultrapassagem é representado, no TRARR, por uma velocidade crítica, definida para cada veículo. Se a velocidade do pelotão for menor que esta velocidade crítica, o motorista sente-se impelido a fazer uma ultrapassagem; caso contrário, ele segue no pelotão. A velocidade crítica é determinada pelo produto da velocidade básica desejada e do *happy speed factor* (parâmetro *VHSFN*), que deve ser menor ou igual a 1. Para determinar o melhor valor para o parâmetro *VHSFN*, foi feita uma análise paramétrica do efeito do *happy speed factor* sobre duas medidas de desempenho: a velocidade média dos veículos e a porcentagem de veículos que trafega em pelotões.

4.5 Organização dos dados

Neste item descreve-se como os dados inseridos nos arquivos TRAF, VEHS e ROAD para a realização das simulações foram organizados e também quais valores foram adotados na simulação de cada caso analisado.

4.5.1 Arquivo TRAF

No arquivo TRAF, os parâmetros geralmente modificados são o tempo de simulação (*TSI*) e o tempo de *warm-up* (*TSE*), ambos expressos em segundos. A princípio, *TSI* pode assumir qualquer valor. O tempo de *warm-up* deve ser tal que permita que a rodovia atinja o estado de equilíbrio antes do início do armazenamento dos resultados das simulações. Define-se as zonas de *warm-up* (Figura 3.1) denominados de *DTS1* e *DTS2*, correspondentes a trechos adicionais posicionados antes dos extremos da rodovia. Hoban *et al.* [1991] recomenda que o *TSE* seja equivalente ao tempo mínimo que o veículo mais lento da corrente leva para percorrer todo o trecho estudado. Por exemplo, se a veloci-

dade do veículo mais lento for 54 km/h (15 m/s) e o comprimento da rodovia for L , o valor mínimo de TSE é:

$$TSE = \frac{L}{15} \quad (4.2)$$

Para $L = 10$ km, o valor de TSE obtido deve ser 666,7 s.

Os valores de TSE e TSI podem ser adotados para que o mesmo número de veículos seja observado mas com diferentes volumes de tráfego, em que somente a distribuição dos *headways* de chegada varia a cada simulação [Hoban *et al.*, 1991]. Sendo n o número de veículos que deverá ser observado e ν o volume de tráfego gerado, TSI pode ser estimado como:

$$TSI = 3600 \cdot \frac{n}{\nu} \quad (4.3)$$

Com n igual a 1000 veículos e os valores de ν variando entre 400, 800 e 1200 veíc/h, os valores de TSI devem ser respectivamente:

$$TSI = 3600 \cdot \frac{n}{\nu} = 3600 \cdot \frac{1000}{400} = 9000 \text{ s} \quad (4.4)$$

$$TSI = 3600 \cdot \frac{n}{\nu} = 3600 \cdot \frac{1000}{800} = 4500 \text{ s} \quad (4.5)$$

$$TSI = 3600 \cdot \frac{n}{\nu} = 3600 \cdot \frac{1000}{1200} = 3000 \text{ s} \quad (4.6)$$

As velocidades dos veículos foram estimadas através da fita de vídeo e dos sensores automáticos, mas o valor usado foi o obtido pelo vídeo, através da média aritmética dos valores da velocidade em cada trecho (A, B e C – ver Figura 4.7, página 34). As velocidades médias no trecho A-C estudado, obtidas dessa forma, são: $V_{N-S} = 111,43$ km/h (30,95 m/s) e $V_{S-N} = 106,81$ km/h (29,67 m/s). Assim, usando-se (4.1) com $L = 2800$ m, tem-se $TSE_{N-S} = 90,5$ s e $TSE_{S-N} = 94,4$ s. O valor mínimo de TSE que deve ser usado é igual a 94,4 s.

O número de veículos observado foi 46 no sentido N-S e 65 no sentido S-N. O volume de tráfego horário da rodovia foi obtido dos dados dos sensores para coleta automática e são $\nu_{N-S} = 205,12$ veíc/h e $\nu_{S-N} = 203,43$ veíc/h. Assim, o tempo de simulação calculado através de (4.3) será: $TSI_{N-S} = 807$ s e $TSI_{S-N} = 1.150$ s. O valor mínimo de TSI que deve ser usado é igual a 1.150 s.

Inicialmente foram adotados os valores de TSE e TSI, respeitando os limites mínimos estimados anteriormente, e são, 1.800 s (30 minutos) e 10.800 s (3 horas), respectivamente.

Os trechos *DTS1* e *DTS2* devem ter um comprimento tal que não exceda o seguinte valor:

$$DTS \leq DENDS - DUR - 12 \quad (4.7)$$

sendo: *DTS*: comprimento das zonas de *warm-up*, em metros;

DENDS: comprimento de rodovia que os veículos viajam antes de serem removidos da simulação, adota-se geralmente 1.000 m e

DUR: comprimento unitário da rodovia sobre o qual as características da rodovia são uniformes, usa-se geralmente 100 m.

Para o trecho estudado tem-se: *DENDS* = 1.000 m, *DUR* = 100 m, sendo portanto *DTS* = 888 m, o valor calculado.

Foram escolhidas três combinações para os valores de *DTS1* e *DTS2*, dentro do limite máximo calculado, que são: 100 m e 100 m; 100 m e 250 m, e 100 m e 500 m. Esses valores foram usados para determinar qual a combinação que melhor representasse as condições encontradas no local onde foram coletados os dados.

A unidade básica de simulação (*TUN*) é fixada geralmente em 1,0 s, o que significa que o programa atualiza e calcula a velocidade, aceleração, manobra e “estado” (livre, ultrapassando ou em pelotão) de cada veículo a cada 1,0 s. O TRARR fornece uma lista de opções para executar a simulação, que podem ser especificadas através do parâmetro *OPTION*. Essas opções estão apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 : Opções para executar as simulações (*OPTION*).

<i>OPTION</i>	<i>Definição</i>
0	Permite o uso da versão 4.0 do TRARR.
1	Permite o uso da versão 3.2 do TRARR.
2	Permite o uso de arquivo com dados de tráfego.
3	Permite o uso do arquivo com dados sobre as faixas de ultrapassagens.
5	Permite a visualização gráfica da simulação.
6	Permite a visualização da simulação com o decorrer do tempo.

A opção adotada para as simulações é a de número 0, que corresponde ao padrão do TRARR versão 4.0.

A porcentagem de veículos em pelotões é estipulada pelo parâmetro *PFOL* para a direção 1 e 2 (direção 1 é referente ao fluxo de tráfego no sentido N-S, ou seja, no sentido Ribeirão Preto-Araraquara e a 2, no sentido S-N, Araraquara-Ribeirão Preto). Este valor foi estimado a partir dos dados obtidos do vídeo, usando um *headway* menor que 5 s como critério para considerar o veículo em pelotão. Assim, para a faixa de tráfego N-S, $PFOL1 = 26,3\%$ e para o tráfego no sentido oposto, $PFOL2 = 49,1\%$. A Figura 4.12 mostra os veículos trafegando em pelotões, no sentido S-N.

Figura 4.12: Tráfego em pelotão na SP255, próximo ao km 33, sentido S-N.

A partir deste ponto, entende-se por ‘classe’, o veículo que está disponível no arquivo VEHS do TRARR (classes de 1 à 18). ‘Categoria’ é a classificação dada pelo usuário para os veículos que serão observados nas simulações (cars, rigids etc). ‘Tipo’ é veículo observado na rodovia (carro, utilitário etc).

As categorias de veículos (NSTR) que serão observadas são um subconjunto das 18 classes de veículos que podem ser estipuladas no arquivo VEHS. Por exemplo, pode-se ter uma categoria denominada “cars” que engloba todos carros que forem gerados pelo TRARR, bem como pode-se ter uma categoria denominada “rigids”, que irá englobar todos os caminhões rígidos da corrente. Podem ser geradas até 8 correntes de tráfego.

A denominação das categorias pode ser modificada livremente pelo usuário. Para a simulação, o usuário define as categorias de veículos que serão geradas de acordo com as observações feitas no local.

Deve-se estipular, para cada categoria usada, a porcentagem de veículos que deverão ser gerados, dentro das 18 classes de veículos disponíveis. Por exemplo, considere-se as categorias ‘autos’, ‘units’ e ‘rígidos’ usadas neste trabalho. Sendo as classes de veículos que representam os automóveis de número 11 até 18, tem-se os seguintes valores: 7% da classe 12, 3% da classe 13, 43% da classe 14, 5% da classe 15, 25% da classe 16, 17% da classe 17, resultando em 100%. Esse procedimento deve ser feito para cada categoria de veículos que será gerada.

Os veículos observados foram separados em 7 tipos: carro, utilitário, rígidos pesados, rígidos leves, ônibus, moto e articulado (como explicado no item 4.3.3) e agrupados nas categorias que serão geradas durante as simulações. Assim, as categorias usadas foram:

1. Autos: engloba todos os tipos de carros de passeio e utilitários;
2. Units: engloba caminhões rígidos de 2 e 3 eixos e ônibus;
3. Artics: engloba os caminhões articulados do tipo cavalo mecânico e semi-reboque;

O parâmetro *ADVGC* estipula a proporção do fluxo em cada faixa e direção de tráfego e é dada para cada categoria gerada. Por exemplo, os valores 0,5; 0,0; 0,5; 0,0 significam que há 50% de probabilidade dessa categoria de veículos ser atribuída para a direção *DIR1*, na faixa básica e 50% de probabilidade para a *DIR2* na faixa básica, e 0% nas duas direções para o tráfego na faixa auxiliar.

Os valores que foram adotados para o parâmetro *ADVGC* (proporção do fluxo em cada faixa e direção de tráfego) foram obtidos dos dados coletados em campo e estão apresentados na Tabela 4.12

Tabela 4.12: Valores atribuídos ao parâmetro *ADVGC* (%).

Número de correntes geradas	Automóveis		Caminhões rígidos		Caminhões articulados	
	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N
1	0,3905	0,6095	-	-	-	-
2	0,3667	0,6333	0,4222	0,5778	-	-
3	0,3667	0,6333	0,4444	0,5556	0,3333	0,6667

Obs.: A distribuição do volume de tráfego é relativa somente às faixas básicas em cada direção de tráfego.

O volume de tráfego bidirecional, representado pelo parâmetro $VMIT$, também é estipulado para cada categoria veicular e expresso em veíc/h. Os parâmetros relacionados com a velocidade dos veículos são VMF e $VSDF$, respectivamente a velocidade média desejada e o desvio padrão da velocidade, em km/h. A velocidade desejada adotada é a equivalente à velocidade do 85º percentil dos veículos livres e líderes de pelotões observados no trecho. O volume bidirecional ($VMIT$) adotado para cada categoria de veículos está apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Valores atribuídos ao parâmetro $VMIT$ (veíc/h).

<i>Correntes geradas</i>	<i>Automóveis</i>	<i>Unitários</i>	<i>Articulados</i>
1	420,0	-	-
2	240,0	180,0	-
3	260,0	124,0	36,0

As velocidades médias desejadas dos veículos no trecho estudado estão apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Valores atribuídos aos parâmetros VMF e $VSDF$ (km/h).

<i>Número de correntes geradas</i>	<i>Automóveis</i>		<i>Veículos unitários</i>		<i>Caminhões articulados</i>	
	<i>Velocidade (km/h)</i>	<i>Desvio padrão da velocidade</i>	<i>Velocidade (km/h)</i>	<i>Desvio padrão da velocidade</i>	<i>Velocidade (km/h)</i>	<i>Desvio padrão da velocidade</i>
1	118,4	20,8	-	-	-	-
2	127,6	27,2	97,0	9,6	-	-
3	127,6	27,2	104,4	14,9	89,6	4,2

O TRARR oferece várias alternativas (15 no total) para a distribuição de velocidades: a normal, representada pelo número 1; log-normal, com número 2; exponencial, com número 3, dentre outras. Para a correta escolha da distribuição de velocidade usada nas simulações foram realizados testes de aderência.

Os testes de aderência são uma classe dos testes não-paramétricos, ou seja, os que não são relacionados com os parâmetros de uma determinada população, como por exemplo, a média ou desvio padrão. Nos testes não-paramétricos, como nos outros testes, uma hipótese (H_0) deve ser testada, a qual refere-se à forma de distribuição da população. Nesses testes, admite-se, por hipótese, que a distribuição da variável de interesse na população segue descrita por determinado modelo de distribuição de probabilidade e em seguida testa-se esse modelo, ou seja, verifica-se a boa ou má aderência dos dados da

amostra ao modelo. A rejeição de H_0 em um dado nível de significância indica que o modelo testado é inadequado para representar a distribuição da população [Costa Neto, 1985].

Há três maneiras de se realizar os testes de aderência: pelo qui-quadrado (χ^2), pelo método de Kolmogorov-Sminov e graficamente. A seguir, os dois primeiros testes serão explicados brevemente.

Teste de aderência pelo χ^2

O teste de aderência pelo χ^2 , desenvolvido por Karl Pearson, baseia-se na estatística:

$$\chi_r^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \sum_{i=1}^k \frac{O_i^2}{E_i} - n \quad (4.8)$$

sendo: χ_r^2 : estatística de teste, com v graus de liberdade;

O_i : frequência observada de uma determinada classe ou valor da variável;

E_i : frequência esperada, segundo o modelo testado, dessa classe ou valor da variável;

n : $\sum_{i=1}^k O_i = \sum_{i=1}^k E_i$ = número de elementos da amostra;

k : número de classes ou valores considerados.

Person mostrou que, se o modelo testado for verdadeiro e se todas as $E_i \geq 5$, a quantidade definida em (4.8) terá aproximadamente distribuição χ^2 com:

$$v = k - 1 - m \quad (4.9)$$

sendo: v : graus de liberdade;

k : número de parcelas somadas;

m : número de parâmetros do modelo estimados independentemente a partir da amostra.

O teste é unilateral, sendo a hipótese H_0 rejeitada se $\chi_r^2 > \chi_{v,\alpha}^2$

Para o caso da amostra em estudo nesse trabalho, a hipótese H_0 era que a velocidade pode ser representada por uma distribuição normal. Foi obtido um valor de $\chi_r^2 = 10,71$ e para $\chi_{v,\alpha}^2 = 11,07$ (obtido da Tabela A6.4 de Costa Neto [1985], página 249), o que satisfaz o teste e mostra que a hipótese pode ser aceita.

Método de Kolmogorov-Smirnov

Nesse método a variável de teste é a maior diferença observada entre a função de distribuição acumulada do modelo e da amostra. A função de distribuição acumulada do modelo testado, ou função de repartição, fornece as probabilidades $F(x)$ acumuladas em cada ponto, a da amostra corresponde ao gráfico das frequências relativas acumuladas, denominadas $G(x)$. O teste consta da verificação do valor:

$$d = \max |F(x) - G(x)| \quad (4.10)$$

Esse valor d será comparado com um valor crítico tabelado em função de α e n . Se d for maior que esse valor crítico, rejeita-se H_0 .

Assim, usando-se esse método, foi obtido $d = 0,342$. Adotando-se $\alpha = 5\%$, tem-se $d_{\text{crítico}} = 0,361$ (obtido da Tabela 6.2 de Costa Neto [1985], página 134). Comparando-se esses dois valores, $d < d_{\text{crítico}}$, portanto, a hipótese H_0 não é rejeitada.

Após serem realizados esses testes de aderência nos quais a hipótese H_0 (a velocidade pode ser representada por uma distribuição normal) não pôde ser rejeitada, concluiu-se que a variável adere razoavelmente bem ao modelo de distribuição normal. Assim, o índice usado para indicar o tipo de distribuição de velocidade foi o 1. Os valores da variável *PFQI* (parâmetro usado quando a porcentagem de veículos em pelotões não é fornecida pelo usuário e adotada igual a -1) não foi alterado, usando-se o *default* do programa.

4.5.2 Arquivo VEHS

No arquivo VEHS são especificados os veículos que serão usados nas simulações. Há 18 classes de veículos divididos em caminhões, ônibus e automóveis. Para os veículos pesados (caminhões e ônibus) são separadas as 10 primeiras classes, sendo as demais reservadas para os automóveis. Serão apresentados na Tabela 4.15 os nomes originais dessas classes que estão disponíveis nesse arquivo.

Não é necessário usar todas as classes, contanto que as usadas sejam representativas da corrente de tráfego estudada. Botterill [1997] usou somente as classes dos veículos pesados, renomeando-as de acordo com os veículos que compunham o tráfego estudado. Analisando o arquivo VEHS daquele trabalho, pode-se observar, que a classe 7, originalmente destinada aos ônibus, foi substituída por um outro tipo de caminhão.

Tabela 4.15: Classes de veículos disponíveis no TRARR.

No.	Classes do TRARR
1	Extraordinary vehicle
2	Large road train
3	Small road train
4	Low powered 38 tonner
5	High powered 38 tonner
6	Unloaded artic. truck
7	Bus
8	4 Tonne truck (loaded)
9	1 Tonne truck (loaded)
10	Small truck
11	Car and caravan
12	Unagressive car.
13	Low powered car
14	Average car
15	Large car
16	Average car
17	Average car
18	Sports car

A composição de tráfego apresentada na Tabela 4.16 é relativa à coleta realizada no dia 22/12/99, no trecho próximo ao quilômetro 33 da rodovia SP255, cujos veículos foram devidamente distribuídos pelas classes de veículos disponíveis no TRARR. Naquele dia, os dados foram coletados com três câmeras de vídeo. Entretanto, o tempo de filmagem não foi o mesmo para todas as coletas, sendo usados somente os dados comuns às três câmeras, de onde obteve-se uma amostra com 45 veículos no sentido N-S e 64 no sentido oposto.

Tabela 4.16: Composição da corrente de tráfego na SP255.

Tipo de veículo	Quantidade		Frequência (%)	
	N-S	S-N	N-S	S-N
Carro	16	33	35,55	51,56
Utilitário	8	9	17,78	14,06
Rígido pesado	10	8	22,22	12,50
Rígido leve	4	8	8,89	12,50
Ônibus	1	0	2,22	0,00
Moto	3	0	6,67	0,00
Articulado	3	6	6,67	9,38
Total	45	64	100	100

A distribuição dos veículos pelas classes do TRARR foi feita após o levantamento das semelhanças entre as características físicas e mecânicas dos veículos observados e os disponíveis no arquivo VEHS. Por exemplo, os automóveis Vectra, da GM e Marea

da Fiat têm potência e comprimento bastante parecidos com os dos veículos da classe *Large car*, e por isso foram colocados nessa categoria. Esses agrupamentos e alocações foram feitos com todos os veículos observados.

O modelo dos caminhões rígidos leves e pesados, dos caminhões articulados, dos ônibus e utilitários foi escolhido de acordo com os dados do anuário estatístico publicado em 1999 pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), do qual foi determinado qual o modelo mais vendido de cada uma dessas classes e de cada marca analisada (Volkswagen, Ford, General Motors, Mercedes-Benz e Scania). Ou seja, o modelo de caminhão, dentre as marcas analisadas, que apresentou o maior volume de vendas foi o escolhido para ser usado nas simulações. Por exemplo, a classe dos caminhões rígidos leves tinha as seguintes alternativas para o ano de 1997: Volkswagen, modelo 8140, com 2.107 unidades; Ford, modelo F-4000, com 3.954 unidades; General Motors, modelo 7-110 com 927 unidades; Mercedes-Benz, modelo 710, com 2.956 unidades; a Scania não possui nenhum modelo nessa categoria. Portanto, para a classe denominada “rígido leve” foi adotado o modelo F-4000 da Ford, do qual foram adotados os dados sobre o comprimento e o peso usados na simulação.

As motos foram desconsideradas neste trabalho pois o modelo TRARR não possui uma classe, dentro do arquivo VEHS, representativa deste tipo de veículo. Após realizado o procedimento descrito, os tipos dos veículos selecionados para compor o arquivo VEHS estão apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Modelo e marca dos veículos selecionados.

<i>Classes do TRARR</i>	<i>No.</i>	<i>Tipo de veículo</i>	<i>Modelo/Marca selecionado</i>
Low powered 38 tonner	4	Rígido pesado	L-1620/MB
High powered 38 tonner	5	Articulado carregado	NL12 360 EDC 4x2/Volvo
Unloaded artic. Truck	6	Articulado vazio	NL12 360 EDC 4x2/Volvo
Bus	7	Ônibus	OF-1721/MB
1 Tonne truck (loaded)	9	Utilitário pesado	S-10 cabine simples/GM
Small truck	10	Rígido leve	F-4000/Ford
Car and caravan ⁽¹⁾	11	Carro com reboque	
Unaggressive car.	12	Carro não-agressivo	A1 ⁽²⁾
Low powered car	13	Carro de baixa potência	A2 ⁽²⁾
Average car	14	Carro médio I	A3 ⁽²⁾
Large car	15	Carro grande	A4 ⁽²⁾
Average car	16	Carro médio II	A5 ⁽²⁾
Average car	17	Utilitário leve	Saveiro/VW
Sports car ⁽¹⁾	18	Carro esporte	

Obs.: (1) Os veículos das classes 1, 2, 3 e 8 não foram usados nas simulações.

(2) Grupo formado por automóveis de características semelhantes.

Os dados sobre as características físicas e mecânicas dos veículos escolhidos são apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19 e foram obtidos de literatura técnica dos fabricantes, de sites na Internet (Ford, GM, Volkswagen etc) e de publicações especializadas (revista Autodata). No caso dos veículos mais antigos, os dados foram obtidos de publicações especializadas (revista Quatro Rodas). Na Tabela 4.18 também estão apresentados os automóveis que compõem cada grupo formado.

Tabela 4.18: Veículos com características semelhantes.

<i>No.</i>	<i>Modelo/Marca selecionado</i>	<i>Potência (kW)</i>	<i>Comprimento (m)</i>	<i>Peso ⁽¹⁾ (t)</i>
A1	Kombi/VW	42,5	4,505	2,250
	Fusca/VW	48,0	4,050	0,801
A2	Belina	52,8	4,488	0,978
	Caravan	55,7	4,676	1,214
A3	Corsa/GM	44,0	3,759	1,32
	Fiesta/Ford	47,6	3,823	0,995
	Gol 1000 16V/VW	42,0	3,883	1,345
	Palio 1000/Fiat	44,7	3,735	1,290
	Uno Mille/Fiat	41,8	3,644	1,260
A4	Vectra/GM	90,1	4,495	1,220
	Marea/Fiat	93,0	4,393	1,775
	Escort SW/Ford	84,0	4,300	1,230
	Golf 1.6/VW	74,0	4,149	1,117
A5	Monza/GM	80,6	4,500	1,105
	Polo/VW	71,1	4,137	1,480
	Santana/VW	72,5	4,607	1,535

Obs.: (1) O valor do peso usado foi o equivalente ao peso bruto total combinado (PBTC).

Tabela 4.19: Características físicas e mecânicas dos veículos pesados.

<i>Classe</i>	<i>Modelo/Marca selecionado</i>	<i>Potência (kW)</i>	<i>Comprimento (m)</i>	<i>Peso (t)</i>	<i>Combustível</i>
4	L-1620/MB	150,0	8,662	21,9	D
5	NL12 360 EDC 4x2/ Vol- vo carregado	262,0	19,287	42,0	D
6	NL12 360 EDC 4x2/ Vol- vo vazio	262,0	19,287	15,5	D
10	F-4000/Ford	99,3	6,341	10,5	D

No TRARR é possível gerar até 8 categorias de veículos. Nesta pesquisa foram geradas três: “Autos”, “Units” e “Artics”. A Tabela 4.20 mostra a quantidade de veículos de cada classe disponível no TRARR e a Tabela 4.21 a distribuição dos veículos de acordo com o número de categorias geradas. Os dados apresentados nas Tabelas 4.20 e 4.21 são relativos aos veículos das correntes de ambos os sentidos de tráfego.

Tabela 4.20: Porcentagem dos veículos em cada classe.

<i>Classe</i>	<i>Modelo/Marva selecionado</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Frequência (%)</i>
4	L-1620/MB	18	16,98
5	NL12 360 EDC 4x2/Volvo carregado	4	3,77
6	NL12 360 EDC 4x2/Volvo vazio	5	4,72
7	Ônibus	1	0,94
9	S-10 cabine simples/Ford	5	4,72
10	F-4000/Ford	12	11,32
12	A1	4	3,77
13	A2	2	1,89
14	A3	26	24,53
15	A4	3	2,83
16	A5	15	15,09
17	Saveiro/VW	10	9,52
Total		105	100,00

Tabela 4.21: Distribuição dos veículos de acordo com as categorias.

<i>Número de correntes geradas</i>	<i>Categorias</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Frequência (%)</i>
1	Geral	105	100,00
	Autos	65	61,90
2	Trucks	40	38,10
	Autos	65	61,90
3	Units	31	29,52
	Artics	9	8,58

As simulações foram executadas para cada alteração nos dados do arquivo VEHS e os resultados comparados entre si e também com os valores observados. Essas comparações serviram para verificar a influência do parâmetro alterado nos resultados das simulações e também as variações sofridas nos resultados.

A modificação feita no arquivo VEHS foi com relação às classes de veículos. Foram alterados os dados dos veículos pesados de número 4, 5, 6 e 10, que receberam uma nova denominação (ver Tabela 4.17). Os seus dados físicos e mecânicos também foram alterados. Esses dados sofreram modificações gradativas e combinadas, para a análise dos resultados. Iniciam-se as modificações somente nos dados do veículo da classe 4. Em seguida, volta-se os dados desse veículo para o valor original e modifica-se os dados de outro veículo e assim por diante. Em seguida, mantém-se as modificações nos dados de um veículo e alternam-se as modificações dos dados de outros veículos. Esse procedimento é feito até que todos os veículos tenham os seus dados modificados simultaneamente.

Os dados dos automóveis, representados pelas classes de número 11 à 18, foram analisados de forma diferente. Foram feitas simulações com os dados originais e com os dados modificados para verificar a influência das alterações nos resultados obtidos, pois supõe-se que o desempenho dos automóveis australianos não seja muito diferente do dos brasileiros. Os demais veículos (1, 2, 3 e 8) não foram utilizados nas simulações por não haver veículos com características semelhantes na corrente observada e também, como uma forma de facilitar a manipulação dos dados, reduzindo o número de casos a serem analisados.

Outros parâmetros modificados foram o VXP , que representa a relação potência/massa dos veículos quando estão realizando manobras de ultrapassagem e o VNP , que representa a relação potência/massa dos veículos quando não estão realizando manobras de ultrapassagem.

Os valores para estes parâmetros foram obtidos de dados coletados em balanças instaladas nos quilômetros 58 e 110 da rodovia Anhanguera (SP330) [Demarchi & Setti, 1999]. Para os outros veículos que não se encaixam nessa classificação (os ônibus e as caminhonetes), os dados foram obtidos de catálogos fornecidos pelos fabricantes.

Os valores adotados para os parâmetros VXP e VNP (relação potência/massa dos veículos), estão apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22: Valores atribuídos aos parâmetros VXP e VNP (kW/t).

	<i>Classe</i>	<i>Modelo original</i>		<i>Modelo recalibrado</i>	
<i>Tipo de veículo</i>	<i>veicular</i>	<i>VXP</i>	<i>VNP</i>	<i>VXP</i>	<i>VNP</i>
Caminhão rígido					
Leve	10	50,00	45,00	17,24	9,90
Pesado	4	5,00	5,00	9,71	5,00
Caminhão articulado					
Carregado	5	7,00	7,00	8,47	5,81
Vazio	6	19,00	17,00	19,00	17,00

4.5.3 Arquivo ROAD

O arquivo ROAD serve para descrever as características do trecho sendo simulado. Estes dados foram obtidos a partir do projeto geométrico da rodovia fornecido pela divisão regional do DER localizada em Ribeirão Preto.

Os dados levantados a partir do projeto geométrico foram *DSS*, *DENDS*, *DUR*, *Bendiness*, *Chainage Comments*, *Barrier Lines*, *Auxiliary Lines*, *Grade* e *Curve Radius*. A definição desses parâmetros está na apresentada na Tabela 4.23.

Tabela 4.23: Parâmetros do arquivo ROAD.

Parâmetro	Definição
DSS	Comprimento de rodovia simulado (m).
DENDS	O ponto final do comprimento de rodovia simulado (m).
DUR	Comprimento unitário da rodovia sobre o qual as características da rodovia são uniformes. Usa-se, em geral, 100 m.
Bendiness	Grau de curvatura por unidade de distância (graus/km).
Chainage	Pontos do trecho de rodovia simulado.
Barrier lines	Marcação dos trechos onde são permitidas ou proibidas as manobras de ultrapassagem: 1 quando não existe nenhuma restrição e -1, caso contrário.
Auxiliary lanes	Existência de faixas auxiliares para a realização das manobras de ultrapassagens. Quando há faixas, marcar T, caso contrário, F.
Sight distance	Distância de visibilidade de frenagem (m). Marcado para cada ponto em cada sentido da faixa.
Grade	Inclinação da rampa. Aclives recebem valor positivo e declives, negativo.
Curve radius	Raio da curva horizontal (m). Para trechos retos, considerar como sendo uma curva de raio infinito, dando o valor 9999.

A marcação da sinalização horizontal que restringe as manobras de ultrapassagem é feita de acordo com a mão inglesa de direção, considerando-se que os veículos trafeguem na pista da esquerda.

O valor do 85º percentil de velocidade desejada (*Desired 85%ile Speed*) foi determinado a partir dos dados obtidos do vídeo, cujo valor corresponde ao 85º percentil das velocidades dos veículos livres.

Outros valores que devem ser modificados nesse arquivo são os dos *road speed indices*, índices usados para estimar a variação da velocidade dos veículos devido a geometria da via. Esses valores são lidos do arquivo MULTIP, cujos valores são calculados de acordo com o modelo desenvolvido por Watanatada *et al.* [1987] denominado *probabilistic steady state speed model*.

Os valores desses índices não foram recalculados e foram adotados do arquivo já montado. Esse arquivo possui 630 índices divididos em 4 grupos de velocidade. Cada grupo corresponde a uma categoria de veículo, ou seja, o grupo 1 corresponde ao caminhões articulados, o 2 aos caminhões rígidos, o 3 aos automóveis e o 4 aos automóveis velozes.

Os 630 índices são baseados no *bendiness* da rodovia, no ângulo de inclinação das rampas e nos raios das curvas horizontais de acordo com as seguintes condições:

- *Bendiness*: valores 0, 15, 30, 50, 70, 95, 120, 150, 200 e 250;

- Inclinação das rampas: valores 0%, 5% e 7%;
- Raios das curvas horizontais: valores 9999, 1500, 900, 650, 510, 410, 340, 290, 250, 215, 185, 160, 140, 120, 105, 95, 85, 75, 65, 55 e 45.

O *road speed index* é determinado para cada trecho de rodovia de comprimento *DUR*. Por exemplo, se o trecho de rodovia simulado foi dividido em trechos de 100 m cada um, é necessário determinar um índice para cada um desses trechos de 100 m. Determina-se o índice a partir do *bendiness* da rodovia, a inclinação da rampa e o raio da curva horizontal no trecho especificado. Em seguida consulta-se o arquivo MULTIP e determina-se qual o índice correspondente à esses dados. Para exemplificar o procedimento, suponha-se que o *bendiness* da rodovia seja igual a 120 e o trecho analisado tenha uma rampa de inclinação de 5% e uma curva horizontal de raio 650 m. Consultando a tabela de dados do arquivo MULTIP, conclui-se que o índice relativo àquele trecho é o de número 403. Isso deve ser feito para cada trecho do segmento de rodovia simulado.

4.6 Verificação da recalibração

O processo de verificação da recalibração consistiu na comparação dos dados coletados no campo com os resultados obtidos na simulação, usando-se os parâmetros preestabelecidos no TRARR (arquivo VEHS original) e os novos parâmetros (arquivo VEHS modificado). A comparação foi feita em termos da velocidade média dos veículos, da porcentagem de veículos em pelotões (em quatro pontos do trecho) e da taxa de ultrapassagens.

4.7 Validação do modelo

Para a validação do modelo é necessária a realização de uma nova coleta de dados, mas em um trecho diferente daquele onde foram coletados os dados para a recalibração.

A validação consiste em executar uma simulação com os dados geométricos (inclinação de rampas, raios de curvas horizontais, marcação da sinalização horizontal) e sobre o fluxo de tráfego (volume, velocidade média e porcentagem de veículos em pelotões) do trecho onde a nova coleta foi realizada. Os resultados assim obtidos serão comparados com os dados coletados. Dessa comparação, o modelo poderá ser considerado ou não recalibrado e válido para ser usado na simulação de rodovias de pista simples do Estado de São Paulo.

Capítulo 5

RECALIBRAÇÃO DO MODELO

A recalibração do modelo é uma das etapas mais importantes do trabalho, envolvendo a realização de muitas simulações. Este capítulo contém a descrição das simulações que fizeram parte dos experimentos que foram realizados para a recalibração do modelo. Uma das vantagens de se usar o TRARR é que o tempo gasto para executar cada simulação é muito curto, da ordem de segundos. Caso contrário, não seria viável adotar este procedimento para recalibrar o modelo.

5.1 O processo de recalibração

A recalibração do modelo será realizada através da comparação dos resultados obtidos nas simulações com os dados coletados em campo. Para esta pesquisa foram adotadas duas formas de comparação: através da análise de gráficos e através do cálculo das diferenças relativas entre os resultados simulados e os dados observados.

Na maioria dos casos, usou-se a análise gráfica feita por meio da apresentação dos pontos relativos aos resultados das simulações em função dos dados observados. Os gráficos construídos tinham como abscissa os dados observados e na ordenada os resultados simulados e ainda, uma linha diagonal a 45° que serviu como base para a avaliação da precisão dos resultados. Ou seja, quanto mais próximo o ponto estiver dessa linha diagonal, melhor o resultado, em que cada ponto representa a relação entre o resultado obtido e o respectivo dado observado.

Em alguns casos, usou-se as diferenças obtidas entre os resultados das simulações e os dados observados como outra forma de comparação no processo de recalibração do modelo. Essas diferenças foram calculadas em valores percentuais.

5.2 Experimentos de simulação

Vários experimentos de simulação foram realizados para verificar o efeito da alteração dos valores atribuídos aos parâmetros do TRARR e a sua respectiva influência nos resultados da simulação.

Como os resultados dos experimentos de simulação devem ser considerados como uma amostra estatística, teve-se o cuidado de replicar cada simulação 30 vezes. No TRARR, a replicação de uma simulação é controlada pelo parâmetro *NSEED*, que é usado para criar a seqüência de números aleatórios usados na geração da corrente de tráfego simulada. O parâmetro *NSEED* é um número atribuído pelo usuário, e pode variar de 0 à 999999. Assim, alterando-se o *NSEED*, é possível replicar uma simulação, pois o programa gera uma nova corrente de tráfego, diferente de qualquer outra que não seja baseada no mesmo *NSEED*.

Os dados apresentados neste capítulo são referentes à média aritmética dos resultados de 30 replicações de cada simulação, obtidas usando-se 30 *NSEED* diferentes. Este tamanho da amostra foi adotado a partir do teste, baseado em Vasconcelos [1982], feito para determinar o tamanho da amostra que seria representativa da população estudada.

Assim, segundo Vasconcelos [1982], dada uma certa população P , de média μ e desvio padrão σ , a amostragem de alguns valores (amostra $n < P$) trará estimativas de média ($\bar{X}$, diferente de μ) e desvio padrão ($S_{\bar{X}}$, diferente de σ). A diferença entre o valor estimado e o valor real é chamado então de erro, dado normalmente na forma $\bar{X} \pm e$, num determinado nível de confiança.

Para uma distribuição Normal:

- Existe 68,3% de probabilidade de que a média real esteja no intervalo:

$$\bar{X} - S_{\bar{X}} \leq \mu \leq \bar{X} + S_{\bar{X}} \quad (5.1)$$

- Existe 95,5% de probabilidade de que a média real esteja no intervalo

$$\bar{X} - 2S_{\bar{X}} \leq \mu \leq \bar{X} + 2S_{\bar{X}} \quad (5.2)$$

e assim por diante, para qualquer fração de $S_{\bar{X}}$, com sua probabilidade correspondente.

A precisão depende da variância da população e do tamanho da amostra colhida, quanto maior é a variância, maior deverá ser a amostra para produzir estimativas mais precisas.

O índice representativo do nível de confiança desejado (k) tem relação com o tipo de distribuição dos dados. Para o caso de uma curva normal, $k = 1,0$ para 68,3% e $k = 2,0$ para 95,5% ($k = 1,96$ para 95,0%).

O tamanho da amostra é dado por:

$$N = \frac{(k \cdot S)^2}{d^2} \quad (5.3)$$

em que d corresponde ao erro admissível.

A amostra inicial selecionada possuía 10 elementos (n). A média ($\bar{X}$) e o desvio padrão (S) calculados foi de 94,7 e 2,3, respectivamente. O desvio padrão da média é:

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{2,3}{\sqrt{10}} \Rightarrow S_{\bar{X}} = 0,73 \quad (5.4)$$

O erro para o nível de confiança de 95,0% é:

$$e = \frac{k \cdot S_{\bar{X}}}{\bar{X}} = \frac{1,96 \cdot 0,73}{94,7} \Rightarrow e = 1,51\% \quad (5.5)$$

Para um erro de 1% e nível de confiança de 95%, o tamanho da amostra deve ser:

$$d = (1\%) \cdot \bar{X} = (1\%) \cdot 94,7 \Rightarrow d = 0,947 \quad (5.6)$$

$$N = \frac{(k \cdot S)^2}{d^2} = \frac{(1,96 \cdot 2,3)^2}{0,947^2} = 22,7 \Rightarrow N = 23 \quad (5.7)$$

Desse modo, do resultado obtido no teste, adotou-se uma amostra com 30 elementos para ser analisada neste trabalho.

5.2.1 Descrição dos experimentos de simulação

A recalibração do TRARR foi realizada em etapas, nas quais analisava-se o efeito de uma mudança nos parâmetros do arquivo VEHS. O processo de recalibração foi composto por seis experimentos de simulação, cujos objetivos estão descritos a seguir.

Experimento 0: Uso dos parâmetros originais do modelo

O primeiro experimento de simulação foi realizado mantendo-se os parâmetros originais do arquivo VEHS. Apenas os arquivos TRAF (cujos dados são usados para descrever a

corrente de tráfego) e ROAD (cujos dados são usados para descrever a geometria e a sinalização horizontal da rodovia) foram construídos para refletir as características do trecho estudado. Os resultados assim obtidos serviram como base de comparação para os demais.

Experimento 1: Influência do número de categorias geradas

O TRARR permite que na simulação sejam geradas até oito categorias de veículos através do parâmetro *NSTR*, que pertence ao arquivo TRAF. No arquivo VEHS há 18 classes de veículos, que são agregadas para formar cada uma das categorias geradas. Essas categorias são estipuladas de acordo com os tipos de veículos observados em campo e correspondem à quantidade (em porcentagem) de cada tipo de veículo dentro de cada categoria gerada (para maiores detalhes, ver item 4.5.1, página 51). O objetivo do experimento 1 foi verificar a influência que o número de categorias usado para descrever a corrente de tráfego exerce sobre o resultado da simulação. Para tanto, optou-se por usar até três categorias de veículos, já que a versão usada não permitia o uso de um número maior que três. As categorias geradas nas simulações foram denominadas: ‘Autos’, que inclui os automóveis, os utilitários leves e pesados; ‘Units’, que inclui os caminhões rígidos e os ônibus, e ‘Artics’, que inclui os caminhões articulados.

Experimento 2: Influência do headway crítico adotado para considerar um veículo em pelotão

Este experimento visa determinar o efeito causado nos resultados da simulação pelo parâmetro usado pelo TRARR para determinar se um veículo está trafegando sozinho ou se faz parte de um pelotão (*TFOL*). Pela lógica do TRARR, estabelece-se um *headway* crítico: se o *headway* entre dois veículos sucessivos for menor que este valor, o programa considera que eles formam um pelotão, caso contrário, o programa considera que eles estão viajando isoladamente. Diversas medidas são afetadas por este parâmetro, dentre elas, a porcentagem de veículos que trafegam em pelotão – a partir de que pode-se estabelecer o nível de serviço em cada ponto do trecho estudado. Neste experimento os valores de *TFOL* variaram entre 3,0 e 5,0 s, visando determinar o melhor valor de *TFOL*.

Experimento 3: Uso dos parâmetros originais dos automóveis

Cada classe de veículo disponível no arquivo VEHS no TRARR possui um conjunto de parâmetros relativos às características físicas e mecânicas dos veículos e comportamentais dos motoristas que estão dirigindo esses veículos. A diferença entre esse caso e o primeiro realizado (experimento 0) está no fato de que somente os parâmetros relativos aos veículos pesados foram modificados, mantendo-se os parâmetros originais das classes dos automóveis. Os parâmetros modificados foram: a relação potência/massa usada em situações de não-ultrapassagem (VNP); a relação potência/massa usada em ultrapassagens; o comprimento do veículo (VLN) e a massa do veículo ($VFCF$). Esses parâmetros foram modificados para os veículos das classes 4 (caminhão rígido pesado), 5 (caminhão articulado carregado), 6 (caminhão articulado vazio) e 10 (caminhão rígido leve).

Experimento 4: Alteração dos parâmetros descritivos dos automóveis e dos veículos pesados

Neste experimento foi mantida a modificação feita no experimento 3 nos parâmetros descritivos das características físicas e mecânicas dos veículos pesados e modificados os valores desses mesmos parâmetros para os automóveis. O objetivo foi observar a influência da variação conjunta desses valores nos resultados da simulação. As classes representativas dos veículos pesados usadas foram as mesmas do experimento anterior e as classes dos automóveis foram as de número 12 à 17.

Experimento 5: Alteração do parâmetro descritivo da velocidade dos veículos

Neste experimento foi alterado o parâmetro descritivo da velocidade média dos automóveis, LIF . Esse parâmetro, que varia entre 1 e 4, estipula a velocidade na qual o motorista irá viajar de acordo com o tipo de veículo. O número 1 corresponde aos veículos articulados; o 2 aos caminhões rígidos; o 3 aos automóveis e o 4 aos automóveis velozes. Desse modo, a atribuição dos valores de LIF foi feita da seguinte forma: as classes 1, 2, 3, 5 e 6 receberam LIF igual a 1; as classes 4, 7, 8 e 10 receberam LIF igual a 2; as classes 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17 receberam LIF igual a 3 e a classe 18 recebeu LIF igual a 4.

Experimento 6: Influência do “happy speed factor”

Na lógica do TRARR o *happy speed factor* é um parâmetro que representa o comportamento do motorista com relação aos pelotões. Dependendo do valor do *happy speed factor*, o comportamento do motorista será mais ou menos agressivo, o que afeta o número de ultrapassagens realizadas. A determinação do melhor valor do *happy speed factor* foi feita por meio de uma análise paramétrica, na qual o efeito da variação desse parâmetro sobre o número de manobras de ultrapassagem foi verificado. Esta modificação foi feita somente para as classes correspondente aos automóveis, já que a maioria das ultrapassagens são realizadas sobre os veículos pesados, geralmente os líderes de pelotões.

5.2.2 Discussão dos resultados obtidos no processo de recalibração

Os resultados dos experimentos de simulação são descritos neste item. Como o arquivo de saída do TRARR fornece muitos dados (ver Anexo B), a análise foi realizada para algumas medidas de desempenho selecionadas, que são:

1. Velocidade média no trecho de cada categoria de veículo, obtida para cada direção de tráfego;
2. Porcentagem de veículos em pelotões, medida em pontos específicos da rodovia, em cada faixa de tráfego;
3. Taxa de ultrapassagens, que corresponde ao número de veículos ultrapassados em relação ao número total de veículos e à extensão do trecho simulado, medida para cada direção de tráfego.

Os resultados dos experimentos realizados são apresentados e discutidos nos itens seguintes.

Experimento 0: Uso dos parâmetros originais do modelo

O experimento 0 foi realizado para que fossem obtidos os resultados que serviram de base para as comparações com os dados observados e os resultados das demais simulações. Essas comparações foram feitas para analisar a possível melhora dos resultados de acordo com as modificações feitas nos arquivos de dados do TRARR. Assim, a simulação usando-se os parâmetros originais dos arquivos VEHS e OBS forneceu os resultados apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 e nas Figuras 5.1 à 5.4.

A Figura 5.1 mostra a representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 5.1, onde pode ser notada a variação nos resultados obtidos através da dispersão dos pontos.

Tabela 5.1: Velocidade média observada e simulada no experimento 0.

Tipos/categorias de veículos	Valores observados	Velocidade média (km/h)		
		Número de categorias geradas		
		1	2	3
Automóveis	102,9	101,2	97,6	98,1
Caminhões rígidos	86,1	95,6	88,0	88,4
Caminhões articulados	84,6	97,0	89,4	96,2
Corrente única	95,4	99,2	94,1	95,1

Figura 5.1: Velocidade média dos veículos obtida no experimento 0.

Ainda pelo gráfico, pode-se observar que não há uma constância nos resultados, existindo variação tanto pelo tipo de veículo considerado como pelo número de categorias geradas. Para 1 categoria, a velocidade obtida para os automóveis foi muito próxima ($\Delta = -1,65\%$), não ocorrendo o mesmo para os caminhões rígidos e articulados (Δ em torno de 13%). Agora, considerando automóveis, houve variação de acordo com o número de categorias geradas, sendo obtidos os valores mais próximos para 1 e 3 categorias geradas. Já para os caminhões articulados, a menor diferença ficou para 2 categorias geradas.

Tabela 5.2: Porcentagem de veículos em pelotões observada e simulada no experimento 0.

Pontos	Porcentagem de veículos em pelotões			
	Sentido N-S		Sentido S-N	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado
<i>1 categoria gerada</i>				
I	26,8	30,8	47,4	43,9
II	25,4	35,2	47,1	46,8
III	27,0	34,7	43,7	50,1
IV	26,5	36,5	44,6	49,6
<i>2 categorias geradas</i>				
I	26,8	31,6	47,4	44,8
II	25,4	37,0	47,1	46,3
III	27,0	36,0	43,7	49,4
IV	26,5	37,8	44,6	49,1
<i>3 categorias geradas</i>				
I	26,8	31,2	47,4	45,0
II	25,4	36,7	47,1	46,6
III	27,0	36,1	43,7	50,0
IV	26,5	37,7	44,6	49,4

Obs.: O esquema com a posição destes pontos pode ser visto na Figura 4.7, página 34.

Figura 5.2: Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 0.

Como uma das medidas de desempenho mais importantes na análise de rodovias de pista simples é a porcentagem de veículos que viajam em pelotões, a influência do número de categorias geradas sobre esta medida de desempenho foi também analisada. A Tabela 5.2 apresenta a variação da porcentagem de veículos que trafega em pelotões

ao longo do trecho, em cada sentido, em função do número de categorias usadas. A Figura 5.2 mostra a representação gráfica dos resultados apresentados na Tabela 5.2.

Pode-se notar que a maioria dos valores previstos para a porcentagem de veículos em pelotões, em todos os pontos no sentido N-S e nos pontos III e IV no sentido S-N, foram superestimados pelo programa.

A Tabela 5.3 mostra a taxa de ultrapassagens observada e obtida na simulação em função do número de categorias usadas. A taxa de ultrapassagens é definida como a relação entre o número de veículos ultrapassados e o produto do número total de veículos pela extensão do trecho, medida em ultrap/veíc.km.

Tabela 5.3: Taxa de ultrapassagens observada e simulada no experimento 0.

Número de categorias geradas	Taxa de ultrapassagens (ultrap/veíc.km)	
	Sentido N-S	Sentido S-N
1	0,072	0,124
2	0,087	0,147
3	0,084	0,140
Valores observados	0,068	0,104

Figura 5.3: Taxa de ultrapassagens obtida no experimento 0.

Como pode ser visto no gráfico da Figura 5.3, a taxa de ultrapassagens dos veículos prevista no trecho foi superestimada para ambos os sentidos de tráfego. Essas diferenças podem ter ocorrido devido, principalmente, à imprecisão dos dados coletados, pois esse é um parâmetro difícil de ser observado em campo.

Essa taxa é função do número de ultrapassagens realizadas no trecho de rodovia estudado. Para o seu cálculo, é necessário levantar o número de ultrapassagens realizadas ao longo do trecho da via estudada. Entretanto, nem sempre se tem um local adequado, como um morro, em que é possível ter uma visão completa do trecho. Ou então, quando esse local existe, muitas vezes não é possível enxergar nitidamente os veículos. Além disso, é comum ocorrerem várias ultrapassagens ao mesmo tempo, em partes distintas da via, tanto numa mesma direção de tráfego, como em direções distintas.

Experimento 1: Influência do número de categorias geradas

No experimento anterior, foram realizadas simulações com uma, duas e três categorias de veículos. Mas como pode ser visto, os resultados variaram de acordo com o número de categorias geradas. Este experimento serviu para definir o melhor número de categorias usadas nas simulações. Esta escolha foi feita através da análise do fluxo de tráfego gerado para cada tipo de veículo simulado. Segundo Archilla & Morrall [1995], é muito importante que a composição do tráfego simulada seja a mais próxima possível da observada, já que existe grande variação na velocidade entre os diferentes tipos de veículos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4: Fluxo de tráfego observado e simulado no experimento 1.

Tipos/ categorias de veículos	Valores observados	Fluxo de tráfego		
		Número de categorias geradas		
		1	2	3
<i>Automóveis</i>	260	264	261	261
<i>Caminhões rígidos</i>	124	120	124	124
<i>Caminhões articulados</i>	36	38	36	36
<i>Corrente única</i>	420	422	421	421

Tabela 5.5: Fluxo de tráfego, em porcentagem, observado e simulado no experimento 1

Tipos/ categorias de veículos	Valores observados	Fluxo de tráfego (%)					
		Número de categorias geradas					
		1	Δ	2	Δ	3	Δ
<i>Automóveis</i>	61,9	62,6	0,7	62,0	0,1	62,0	0,1
<i>Caminhões rígidos</i>	29,5	28,4	-1,1	29,5	0,0	29,5	0,0
<i>Caminhões articulados</i>	8,6	9,0	0,4	8,5	-0,1	8,5	-0,1

Pelos dados apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5, valores muito próximos foram alcançados gerando-se duas e três categorias de veículos, obtendo-se a menor diferença (0,1%) para os caminhões rígidos.

Outra forma de verificar a influência da variação no número de categorias geradas é através da diferença percentual entre os resultados obtidos. Essa diferença percentual foi calculada através da seguinte equação:

$$\Delta = \frac{\bar{Y} - \hat{Y}}{\hat{Y}} \cdot 100 \quad (5.8)$$

em que $\bar{Y}$: resultado obtido com a simulação;

$\hat{Y}$: dado observado em campo.

As diferenças assim obtidas estão organizadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Diferença entre os fluxos de tráfego observados e simulados no experimento 1.

Tipos/categorias de veículos	Diferenças entre os fluxos de tráfego (%)		
	Número de categorias geradas		
	1	2	3
Automóveis	1,54	0,38	0,38
Caminhões rígidos	-3,23	0,00	0,00
Caminhões articulados	5,56	0,00	0,00
Corrente única	0,48	0,48	0,48

Pelos dados apresentados na Tabela 5.6, pode-se notar que as diferenças percentuais entre os valores observados e os obtidos na simulação não foram constantes. O uso de uma única categoria distorce significativamente o número de caminhões articulados no fluxo de tráfego, ainda que praticamente não exista diferença entre o volume total gerado e o observado. Pode-se perceber que a menor diferença ocorre quando a simulação é feita com duas e três categorias (automóveis, caminhões rígidos e caminhões articulados).

Levando-se isso em conta e também a possibilidade de se ter um maior detalhamento dos dados de entrada relativos às categorias de veículos observadas, todas as simulações realizadas posteriormente foram feitas com três categorias de veículos.

Experimento 2: Influência do headway crítico adotado para considerar um veículo em pelotão

Pela lógica do TRARR, um veículo é considerado como viajando em pelotão se o *headway* entre si e o veículo que o precede for menor que um valor preestabelecido. No

TRARR o parâmetro *TFOL* é usado para definir este *headway*. Neste experimento, seu valor variou entre 3,0 e 5,0 s e observou-se o efeito dessa variação sobre a velocidade média dos veículos, a taxa de ultrapassagens e a porcentagem de veículos que viajam em pelotões.

Para cada tempo considerado, um conjunto de resultados foi obtido, do qual pode ser observado que a velocidade média dos veículos e a taxa de ultrapassagens não variaram, sendo os mesmos que os obtidos no experimento 1. Os valores das velocidades obtidos estão apresentados na Tabela 5.7

Tabela 5.7: Velocidade média obtida nos experimentos 1 e 2.

<i>Categoria veicular</i>	<i>Velocidade média (kmh)</i>	
	<i>Simulada</i>	<i>Observada</i>
<i>Automóveis</i>	98,1	102,9
<i>Caminhões rígidos</i>	88,4	86,1
<i>Caminhões articulados</i>	96,2	84,6
<i>Corrente única</i>	95,1	95,4

As taxas de ultrapassagens obtidas foram iguais a 0,084 ultrap/ veíc.km na direção N-S e 0,140 ultrap/veíc.km na direção S-N.

Pode-se observar também que a porcentagem de veículos em pelotões é um fator sensível a qualquer variação desse parâmetro. Ou seja, quanto maior o tempo para considerar um veículo em pelotão, maior é a quantidade de veículos em pelotões considerada pelo modelo. Isso pode ser visto através dos resultados mostrados na Tabela 5.8 e Figura 5.4.

Essa relação entre o *headway* para se considerar um veículo em pelotão e porcentagem de veículos em pelotões já era esperada e reflete o que acontece na realidade, pois se o *headway* crítico aumenta, a porcentagem de veículos em pelotão também deve aumentar. Nesta recalibração, o modelo superestimou a porcentagem de veículos em pelotão na direção N-S e, do contrário, subestimou na direção S-N. Para 5,0s, a diferença entre os valores simulados e os observados foi de 16,5% na direção N-S e -5,1% na direção S-N. Para 3,0 s, as diferenças foram 2,3% na direção N-S e -15,8% na direção S-N.

Tabela 5.8: Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 2.

Pontos	Porcentagem de veículos em pelotões			
	Sentido N-S		Sentido S-N	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado
<i>Headway = 3,0 s</i>				
I	26,8	27,4	47,4	39,9
II	25,4	30,2	47,1	37,6
III	27,0	29,1	43,7	41,1
IV	26,5	30,2	44,6	40,7
<i>Headway = 4,0 s</i>				
I	26,8	28,8	47,4	42,9
II	25,4	34,2	47,1	43,2
III	27,0	33,2	43,7	46,3
IV	26,5	34,7	44,6	46,3
<i>Headway = 5,0 s</i>				
I	26,8	31,2	47,4	45,0
II	25,4	36,7	47,1	46,6
III	27,0	36,1	43,7	50,0
IV	26,5	37,7	44,6	49,4

Obs.: O esquema com a posição destes pontos pode ser visto na Figura 4.7, página 34.

Figura 5.4: Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 2.

Analisando as diferenças obtidas, optou-se por usar 5,0 s como o tempo de *headway* para se considerar um veículo em pelotão, apesar de ter sido o que forneceu a maior diferença entre a porcentagem de veículos em pelotões observada e a simulada, uma vez que esse valor é o de uso corrente [TRB, 1985].

Experimento 3: Uso dos parâmetros originais dos automóveis

Neste experimento foram alterados os parâmetros sobre os veículos das classes 4 (caminhões rígidos pesados), 5 (caminhões articulados carregados), 6 (caminhões articulados vazios) e 10 (caminhões rígidos leves), de acordo com o descrito no item 5.1. Os parâmetros modificados incluem relação potência/massa, comprimento e peso dessas classes de veículos, enquanto que os parâmetros dos automóveis permaneceram inalterados.

Comparando-se os dados observados e os resultados obtidos nas simulações realizadas após a realização dessas alterações, pode-se observar que não houve variação significativa dos resultados com relação a nenhuma variável estudada nesse trecho, sendo os resultados apresentados nas Tabela 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9: Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 3.

<i>Pontos</i>	<i>Porcentagem de veículos em pelotões</i>	
	<i>Sentido N-S</i>	<i>Sentido S-N</i>
I	31,1	44,8
II	36,4	46,4
III	35,6	49,7
IV	36,9	48,9

Tabela 5.10: Velocidade média obtida no experimento 3.

<i>Categoria veicular</i>	<i>Velocidade média (kmh)</i>
<i>Automóveis</i>	98,3
<i>Caminhões rígidos</i>	87,7
<i>Caminhões articulados</i>	96,0
<i>Corrente única</i>	95,0

A taxa de ultrapassagens simulada foi igual a 0,084 ultrap/veíc.km no sentido N-S e 0,143 ultrap/veíc.km no sentido S-N.

Experimento 4: Alteração nos parâmetros descritivos dos automóveis e dos veículos pesados

Neste experimento, os valores dos parâmetros descritivos das características físicas e mecânicas dos automóveis e dos veículos pesados foram modificados simultaneamente. Os resultados obtidos para esse caso não sofreram nenhuma modificação e foram praticamente idênticos aos obtidos no experimento 3. Apesar de somente os parâmetros das classes de 12 à 17 terem sido alterados, foram usados os parâmetros originais do arquivo VEHS relativos à todas as classes dos automóveis (classes 11 à 18) em todas as simulações executadas posteriormente a este experimento. Os parâmetros descritivos

ções executadas posteriormente a este experimento. Os parâmetros descritivos dos veículos pesados usados nas simulações estão apresentados na Tabela 5.11

Tabela 5.11 Parâmetros descritivos dos veículos pesados.

Tipo de veículo	Classe veicular	Parâmetro			
		VNP	VXP	VLN	VFCF
Caminhão rígido					
Leve	10	9,90	17,24	6,34	10,50
Pesado	4	5,00	9,71	8,66	21,90
Caminhão articulado					
Carregado	5	5,81	8,47	19,29	42,20
Vazio	6	17,00	19,00	19,29	15,50

Experimento 5: Alteração do parâmetro descritivo da velocidade dos veículos

A velocidade desenvolvida pelos veículos na simulação é estipulada pelo parâmetro *LIF* – *desired speed group*, que está relacionado com o *road speed index*, um parâmetro definido no arquivo ROAD. Cada trecho simulado da rodovia tem um valor para esse índice, definido de acordo com geometria da via (inclinação da rampa e raio de curvas horizontais), e que é responsável pelas variações na velocidade dos veículos de acordo com a geometria da via e do tipo de veículo.

Estão disponíveis 630 valores de *road speed index* no arquivo MULTIP, e que dependem do alinhamento (*bendiness*) da rodovia (10 valores), das rampas (3 valores) e do raios das curvas horizontais (21 valores). A combinação desses valores fornece os 630 valores disponíveis. O parâmetro *LIF* varia de 1 à 4, sendo o valor 1 representativo dos caminhões articulados, o 2 dos caminhões rígidos, o 3 dos automóveis e o 4 dos automóveis velozes. Assim, para cada um dos 630 índices existem quatro valores, relativos a cada um dos valores de *LIF* possíveis.

Neste experimento, os valores atribuídos ao *LIF* foram substituídos de acordo com o tipo de veículo (caminhão articulado, caminhão rígido, automóvel ou automóvel

Tabela 5.12: Velocidade média obtida no experimento 5.

Tipos/ categorias de veículos	Velocidade média (km/h)						
	Valores observados	Resultados obtidos nos experimentos					
		3	Δ	4	Δ	5	Δ
Automóveis	102,9	98,3	-4,44	98,5	-4,29	97,8	-4,97
Caminhões rígidos	86,1	87,7	1,82	87,7	1,85	88,0	2,20
Caminhões articulados	84,6	96,0	13,47	96,0	13,48	89,7	6,05
Corrente única	95,4	95,0	-0,45	95,1	-0,33	94,2	-1,25

veloz), já que a numeração original não estava de acordo com este critério. Para efeito de comparação, juntamente com os resultados obtidos no experimento 5 estão apresentados os resultados obtidos nos experimentos 3 e 4. Estes resultados estão apresentados nas Tabelas 5.12, 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13: Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 5.

Pontos	Porcentagem de veículos em pelotões			
	Sentido N-S		Sentido S-N	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado
<i>Experimento 3</i>				
I	26,8	31,1	47,4	44,8
II	25,4	36,4	47,1	46,4
III	27,0	35,6	43,7	49,7
IV	26,5	36,9	44,6	48,9
<i>Experimento 4</i>				
I	26,8	31,1	47,4	44,7
II	25,4	36,4	47,1	46,2
III	27,0	35,6	43,7	49,6
IV	26,5	36,8	44,6	48,8
<i>Experimento 5</i>				
I	26,8	31,2	47,4	44,6
II	25,4	36,3	47,1	45,8
III	27,0	35,4	43,7	48,9
IV	26,5	37,0	44,6	48,4

Obs.: O esquema com a posição destes pontos pode ser visto na Figura 4.7, página 34.

Tabela 5.14: Taxa de ultrapassagens obtida no experimento 5.

Experimento	Taxa de ultrapassagens (ultrap/veic.km)	
	Sentido N-S	Sentido S-N
3	0,084	0,143
4	0,087	0,147
5	0,084	0,146
Valores observados	0,068	0,104

Como já era de se esperar, este parâmetro influencia principalmente na velocidade média dos veículos, melhorando os valores obtidos e diminuindo as diferenças entre os valores observados e os simulados. A melhora mais significativa foi obtida na velocidade dos caminhões articulados, em que a diferença caiu de 13,47% para 6,05%. Os demais valores permaneceram praticamente os mesmos.

Dessa forma, os novos valores adotados para o parâmetro *LIF* foram mantidos nas demais simulações e são: as classes 1, 2, 3, 5 e 6 receberam *LIF* igual a 1; as classes

4, 7, 8 e 10 receberam *LIF* igual a 2; as classes 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17 receberam *LIF* igual a 3 e a classe 18 recebeu *LIF* igual a 4.

Experimento 6: Influência do “happy speed factor”

Na lógica do TRARR, o *happy speed factor* serve para indicar quanto os motoristas que trafegam em pelotões sentem-se compelidos a ultrapassar. O maior valor que esse fator pode assumir é 1,0, o que significa que os motoristas estão “menos satisfeitos” em viajar num pelotão. Os veículos pesados, cujos motoristas estão acostumados a viajar em pelotões, têm *happy speed factor* igual a 1,0.

Neste experimento, estudou-se o efeito da variação do *happy speed factor* para automóveis sobre a porcentagem de veículos em pelotão e sobre a taxa de ultrapassagens. Foram feitas modificações simultâneas nos valores do *VHSFN* (quando não há faixa auxiliar para ultrapassagem) e executadas as simulações com os demais parâmetros inalterados. Os resultados obtidos para a porcentagem de veículos em pelotão, para a velocidade média e para a taxa de ultrapassagens estão apresentados nas Tabelas 5.15, 5.16 e 5.17.

Tabela 5.15: Porcentagem de veículos em pelotões obtida no experimento 6.

<i>Happy speed factor</i>	<i>Porcentagem de veículos em pelotões</i>							
	<i>Sentido N-S</i>				<i>Sentido S-N</i>			
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
0,50	36,1	40,3	41,0	45,2	51,2	55,2	57,1	59,0
0,55	36,1	40,2	40,9	45,1	51,0	54,9	56,9	58,9
0,60	36,1	40,0	40,7	44,8	50,6	54,3	56,2	58,3
0,65	36,1	39,6	40,0	44,2	50,0	53,4	55,4	57,5
0,70	36,1	39,0	39,0	43,0	49,2	52,0	54,2	56,2
0,75	36,2	38,5	38,0	41,7	48,2	50,3	52,6	54,3
0,80	36,3	38,0	37,0	40,1	47,1	48,7	51,1	52,3
0,81	36,3	37,9	36,8	39,8	46,9	48,4	50,8	52,0
0,82	36,3	37,8	36,6	39,5	46,7	48,2	50,6	51,6
0,83	36,3	37,6	36,5	39,2	46,4	47,8	50,4	51,2
0,84	36,3	37,5	36,4	38,9	46,2	47,6	50,1	50,8
0,85	36,3	37,4	36,3	38,5	46,0	47,3	49,9	50,5
0,90	36,2	36,8	36,0	37,6	45,2	46,5	49,4	49,0
0,95	36,2	36,5	35,5	37,1	44,7	46,0	49,0	48,5
1,00	36,2	36,1	35,2	37,0	44,5	45,7	48,8	48,2
<i>Valores observados</i>	26,8	25,4	27,0	26,5	47,4	47,1	43,7	44,6

Obs.: O esquema com a posição destes pontos pode ser visto na Figura 4.7, página 34.

Figura 5.5: Efeito do *happy speed factor* sobre a porcentagem de veículos em pelotões.

Tabela 5.16: Velocidade média obtida no experimento 6.

Happy speed factor	Velocidade média (km/h)			
	Automóveis	Caminhões unitários	Caminhões articulados	Corrente única
0,50	92,2	87,4	89,0	90,5
0,55	92,3	87,4	89,0	90,6
0,60	92,6	87,4	89,0	90,8
0,65	93,2	87,5	89,1	91,2
0,70	94,0	87,6	89,2	91,7
0,75	95,0	87,7	89,3	92,3
0,80	95,9	87,8	89,5	93,0
0,81	96,1	87,8	89,5	93,1
0,82	96,3	87,8	89,5	93,2
0,83	96,5	87,9	89,5	93,3
0,84	96,6	87,9	89,5	93,5
0,85	96,8	87,9	89,6	93,6
0,90	97,4	88,0	89,6	93,9
0,95	97,7	88,0	89,7	94,2
1,00	97,8	88,0	89,7	94,3
Observados	102,9	86,1	84,6	95,4

Pode-se perceber pelos gráficos das Figuras 5.5 e 5.6 que uma redução excessiva do *happy speed factor* aumenta a diferença entre os resultados da simulação e os valores observados em campo. Com base nos resultados de análise paramétrica realizada entre os resultados das simulações apresentados na Tabela 5.17, adotou-se o valor 0,83 para o parâmetro $VHSFN$, já que o trecho observado não possuía faixa adicional.

Figura 5.6: Efeito do *happy speed factor* na velocidade média dos veículos.

Tabela 5.17: Taxa de ultrapassagens obtida no experimento 6.

<i>Happy speed factor</i>	<i>Sentido N-S</i>	Δ	<i>Sentido S-N</i>	Δ
0,50	0,015	78,33	0,022	78,94
0,55	0,016	76,76	0,028	73,37
0,60	0,019	72,79	0,038	63,56
0,65	0,024	64,51	0,050	51,54
0,70	0,032	52,55	0,066	36,41
0,75	0,044	35,69	0,087	16,63
0,80	0,056	18,04	0,104	-0,19
0,81	0,058	14,85	0,108	-3,56
0,82	0,060	11,32	0,111	-6,99
0,83	0,063	7,99	0,115	-10,35
0,84	0,065	4,36	0,118	-13,69
0,85	0,068	0,69	0,121	-15,90
0,90	0,076	-11,52	0,134	-29,13
0,95	0,082	-20,54	0,144	-38,65
1,00	0,085	-24,26	0,148	-42,12
<i>Valores observados</i>	0,068		0,104	

5.3 Resumo das alterações feitas nos parâmetros do arquivo VEHS

Em função dos resultados dos experimentos de simulação, a recalibração do modelo TRARR consistiu em alterar seis parâmetros do arquivo VEHS:

- *LIF*: descritor da velocidade desejada;
- *VHSFN*: *happy speed factor* para trechos sem faixas adicionais;
- *VNP*: máxima relação potência/massa usada em situação normal (kw/t);
- *VXP*: máxima relação potência/massa usada em ultrapassagens (kw/t);

- *VLN*: comprimento do veículo (m); e
- *VFCF*: massa do veículo (t).

A Tabela 5.18 mostra os novos valores adotados para estes parâmetros.

Tabela 5.18: Valores dos parâmetros mecânicos alterados na recalibração do modelo.

Tipo de veículo	Classe veicular	Parâmetro			
		VNP	VXP	VLN	VFCF
Caminhão rígido					
Leve	10	9,90	17,24	6,34	10,50
Pesado	4	5,00	9,71	8,66	21,9
Caminhão articulado					
Carregado	5	5,81	8,47	19,29	42,20
Vazio	6	17,00	19,00	19,29	15,50

Tabela 5.19: Valores dos parâmetros comportamentais alterados na recalibração do modelo.

Tipo de veículo	Classe veicular	Parâmetro	
		LIF	VHSFN
Automóvel			
Comum	11 à 16	3	0,83
Esporte	18	4	0,83
Utilitário			
Leve	17	3	0,83
Pesado	9	3	1,00
Ônibus	7	2	1,00
Caminhão rígido			
Leve	10	2	1,00
Pesado	4	2	1,00
Extra-pesado	8	2	1,00
Caminhão articulado			
Carregado	5	1	1,00
Vazio	6	1	1,00
Caminhão extra-pesado	1 à 3	1	1,00

5.4 Conclusões

A recalibração do modelo foi feita através da comparação de resultados de simulações que usavam o arquivo VEHS original e simulações realizadas com um arquivo VEHS modificado, visando recalibrar certos parâmetros do modelo para que a simulação melhor representasse o comportamento observado no campo. Essas comparações foram feitas em termos das seguintes medidas de desempenho:

- Composição do fluxo de tráfego gerado pelo modelo;
- Média da distribuição de velocidades da corrente de tráfego;

- Média da distribuição de velocidades para cada categoria veicular;
- Porcentagem de veículos em pelotões; e
- Taxa de ultrapassagens.

Após a realização dos experimentos de simulação pode-se concluir que os resultados obtidos com o modelo recalibrado melhoraram, indicando que o modelo TRARR é sensível à modificação dos parâmetros mecânicos dos veículos e comportamentais dos motoristas.

Com relação ao número de categorias geradas (uma, duas ou três categorias) pode-se observar que a velocidade média dos automóveis e a taxa de ultrapassagens simuladas são muito próximos dos observados em campo. Entretanto, após uma análise mais ampla dos resultados adotou-se três categorias de veículos, pois foi o caso que gerou resultados melhores.

O tempo para considerar um veículo em pelotão (*TFOL*) exerce influência principalmente na porcentagem de veículos em pelotões. Quanto maior esse valor, maior é a porcentagem de veículos em pelotões. Os demais parâmetros analisados permaneceram inalterados. Entretanto, nesta recalibração, as diferenças entre os valores simulados da porcentagem de veículos em pelotões e os observados, medidos nos pontos de entrada do trecho, variaram entre 16,5% (na direção N-S) e -15,8% (na direção S-N).

A modificação dos parâmetros mecânicos (comprimento, massa e relação potência/massa) dos veículos pesados causou a melhora nas velocidades médias dos caminhões rígidos e articulados, ao contrário da alteração dos parâmetros mecânicos dos automóveis, que não representou nenhuma melhora nos resultados relativos à esse tipo de veículo. Por isso, foram usados alterados os parâmetros *VNP*, *VXP*, *VLN* e *VFCF* correspondente aos veículos pesados e mantidos os dos automóveis.

O parâmetro descritivo da velocidade (*LIF*) dos veículos é um item importante na simulação, pois é responsável pela variação das velocidades dos veículos ao longo do trecho simulado de acordo com a geometria da via e do tipo de veículo. A influência das alterações feitas no parâmetro *LIF* causou uma melhora significativa na velocidade dos caminhões articulados, que inicialmente estava 13% acima da velocidade observada. Após as modificações do *LIF*, essa diferença foi reduzida para 6%.

O único parâmetro comportamental analisado nesta recalibração foi o *happy speed factor*, que indica quanto os motoristas que trafegam em pelotões sentem-se compelidos a realizar uma ultrapassagem. Este parâmetro exerce influência nas medidas diretamente

relacionadas com os pelotões, ou seja, na velocidade média, na porcentagem de veículos em pelotões e principalmente, na taxa de ultrapassagens. Quanto maior o valor do *happy speed factor*, menor é o grau de satisfação do motorista em viajar em pelotões. Por meio de uma análise paramétrica, determinou-se que o valor mais indicado para o *happy speed factor* é 0,83.

Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que as simulações feitas com o modelo recalibrado forneceram resultados marginalmente melhores que as feitas com o modelo original, o que sugere que a recalibração ainda poderia ser melhorada, com novas coletas de dados em trechos mais longos. Uma vez obtido uma versão recalibrada do TRARR, a etapa seguinte do estudo foi realizar a validação do modelo recalibrado, que é descrita no próximo capítulo.

Capítulo 6

VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo recalibrado permite determinar se ele é capaz de representar adequadamente os fluxos de tráfego na rodovia. A recalibração do simulador TRARR, descrita no capítulo anterior, envolveu a realização de mais de 5.000 simulações. Este capítulo discute e apresenta os resultados do processo de validação do simulador.

6.1 O processo de validação

O TRARR já foi recalibrado e validado por vários pesquisadores, Morrall [1995] no Canadá, Adolph May nos Estados Unidos [Silveira, 1996]; e, mais recentemente, na Austrália, pelo ARRB *Transport Research* [Botterill, 1997]. O modelo TRARR pode ser recalibrado modificando-se parâmetros comportamentais (dos motoristas) e de desempenho (dos veículos), que ficam armazenados no arquivo VEHS.

A recalibração do TRARR descrita neste texto restringiu-se a modificar parâmetros relativos aos veículos pesados (caminhões rígidos e articulados), conforme apresentado e discutido no capítulo anterior. A Tabela 6.1 mostra os parâmetros modificados no processo de recalibração e os novos valores que lhes foram atribuídos.

Tabela 6.1: Valores dos parâmetros modificados no modelo recalibrado.

Tipo de veículo	Classe veicular	LIF	Parâmetro				
			VHSFN	VNP	VXP	VLN	VFCF
Caminhão rígido							
Leve	10	2	1,00	9,90	17,24	6,34	10,50
Pesado	4	2	1,00	5,00	9,71	8,66	21,90
Caminhão articulado							
Carregado	5	1	1,00	5,81	8,47	19,29	42,20
Vazio	6	1	1,00	17,00	19,00	19,29	15,50

Com relação ao parâmetro *LIF*, os valores adotados para as demais classes veiculares foram: 1, para as classes veiculares 1, 2 e 3; 2, para as classes veiculares 7 e 8; 3, para as classes 9 e 11 à 17; e 4, para a classe veicular 18. O *happy speed factor* (*VHSEF*) para as classes 11 à 18 foi fixado em 0,83. Para as demais classes o valor permaneceu igual a 1,00.

As simulações para a validação do modelo foram feitas usando-se os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 6.1. O tempo de simulação usado foi 14.400 s (4 horas) e o tempo de *warm-up* foi 1.800 s (30 minutos).

6.2 Coleta de dados para validação do modelo

A coleta dos dados usados na validação do modelo recalibrado foi realizada na rodovia SP255, no trecho entre os quilômetros 31 e 41, que inclui o trecho onde foi realizada a coleta de dados para a recalibração do modelo. Para a validação, usou-se um conjunto menor de dados, que compreendia apenas volume, as distribuições de velocidades e a classificação dos veículos, a porcentagem de veículos em pelotões e a taxa de ultrapassagens.

Para a coleta dos dados sobre o tráfego e a porcentagem de veículos em pelotões foram usados os sensores NC-97 para coleta automática. Os dados para classificação dos veículos e determinação da taxa de ultrapassagens foram coletados manualmente, em pontos previamente escolhidos no trecho. O esquema de numeração dos pontos é crescente no sentido do tráfego, com os pontos I a V no sentido N-S (Ribeirão Preto – Araraquara) e VI a X no sentido S-N (Araraquara – Ribeirão Preto), como se mostra na Figura 6.1.

A localização dos pontos de coleta de dados, em termos de marcos quilométricos, está apresentada na Tabela 6.2 e foi feita através da leitura do odômetro de um veículo trafegando na rodovia com velocidade próxima de 70 km/h.

Tabela 6.2: Localização dos pontos marcados na SP255.

<i>Pontos</i>		<i>Marco quilométrico</i>
<i>N-S</i>	<i>S-N</i>	
I	X	km 32 + 600 m
II	IX	km 33 + 400 m
III	VIII	km 35 + 700 m
IV	VII	km 38
V	VI	km 40 + 800 m

Figura 6.1: Perfil do trecho da SP255 onde foram feitas as coletas de dados para a validação do modelo.

A escolha dos pontos para coleta de dados de ultrapassagem foi feita com base na possibilidade de visualizar os trechos nos quais as manobras de ultrapassagem são permitidas. Como os trechos de faixa contínua localizam-se nas curvas verticais convexas, optou-se por posicionar os observadores nos trechos delimitados por duas curvas verticais convexas sucessivas. Assim, cada observador ficou encarregado de anotar as manobras de ultrapassagem ocorridas em intervalos de 10 minutos. A partir desses dados, pode-se obter a taxa de ultrapassagens, que corresponde ao número de veículos ultrapassados em função do total de veículos e da extensão do trecho.

A coleta de dados foi dividida em dois dias consecutivos e no mesmo horário. Em cada dia, foram coletados dados em três pontos, sendo que em dois deles foram posicionadas duas pessoas, cada uma responsável por coletar o número de ultrapassagens em um sentido de tráfego. Uma única pessoa foi posicionada no terceiro ponto, ficando responsável pela contagem e classificação do tráfego em ambos os sentidos. Em cada ponto foram instalados os sensores NC-97 a partir dos quais fez-se a classificação dos veículos na corrente, obteve-se as distribuições de velocidades e determinou-se a porcentagem de veículos em pelotões. Cada coleta teve duração de 4 horas e foi realizada no período das 12 às 16 horas. Os dados obtidos dessa coleta estão resumidos nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3: Dados coletados na SP255 para validação do modelo.

<i>Tipo de veículo</i>	<i>Sentido Norte-Sul</i>			<i>Sentido Sul-Norte</i>		
	<i>Volume médio</i> (veíc/h)	<i>Velocidade média</i> (km/h)	<i>D.P. da velocidade</i> (km/h)	<i>Volume médio</i> (veíc/h)	<i>Velocidade média</i> (km/h)	<i>D.P. da velocidade</i> (km/h)
Automóveis	94	94,3	14,3	94	95,5	13,1
Utilitários	14	86,5	12,6	17	84,5	10,9
Caminhonetes	9	95,9	12,3	16	93,6	13,2
Caminhões						
Rígidos leves	14	90,3	12,3	20	88,0	12,8
Rígidos pesados	18	86,0	13,2	22	82,2	10,1
Articulados	15	84,4	11,8	22	84,2	9,7
Ônibus	3	87,2	12,1	2	88,5	9,3

6.3 Experimentos de simulação para validação do modelo recalibrado

Neste item serão apresentados os resultados dos experimentos de simulação realizados com dados do trecho da rodovia SP255 usados na validação do modelo. O objetivo é

Tabela 6.4: Ultrapassagens observadas no trecho estudado da SP255.

<i>Trecho</i>	<i>Sentido Norte–Sul</i>		<i>Sentido Sul–Norte</i>	
	<i>Pontos</i>	<i>Ultrapassagens</i>	<i>Pontos</i>	<i>Ultrapassagens</i>
A	IV e V	78	VI e VII	147
B	III e IV	116	VII e VIII	209
C	II e III	97	VIII e IX	400
D	I e II	134	IX e X	286
Total		425		1042

verificar se o modelo recalibrado está reproduzindo adequadamente as situações observadas, além de comparar os resultados obtidos com a versão original do TRARR.

Para verificar a qualidade dos resultados do modelo recalibrado, foram realizadas 30 simulações com o arquivo VEHS adotando-se os valores mostrados na Tabela 6.1. Os valores dos parâmetros de entrada dos arquivos ROAD, OBS e TRAF foram modificados para reproduzir as características geométricas, as condições de tráfego e os pontos para observação e armazenamento dos resultados das simulações do trecho estudado. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 6.5 à 6.10 e são discutidos a seguir.

6.4 Discussão dos resultados das simulações

Analisando-se os dados da Tabela 6.5, que compara o volume de veículos obtido nas simulações com o observado, pode-se notar que, tanto o modelo recalibrado como o original foram capazes de reproduzir adequadamente a corrente de tráfego observada.

Tabela 6.5: Volume de veículos (veíc/h).

<i>Categoria veicular</i>	<i>Observado</i>	<i>Modelo recalibrado</i>	<i>Modelo original</i>
<i>Automóveis</i>	244	244	244
<i>Caminhões rígidos</i>	79	79	79
<i>Caminhões articulados</i>	37	37	37
<i>Corrente única</i>	360	360	360

Para as estimativas das medidas de desempenho usadas na validação do modelo recalibrado (porcentagem de veículos em pelotões, velocidade média e taxa de ultrapassagem), foram calculados intervalos de confiança. Esses intervalos de confiança foram obtidos com nível de significância de 95% – ou seja, existe 5% de probabilidade de erro do valor observado estar fora desse intervalo de confiança. A comparação entre os valores obtidos com o modelo recalibrado e os valores observados na rodovia foi realizada

levando-se em consideração o intervalo de confiança: se o valor observado no campo estiver dentro do intervalo de confiança, pode-se considerar que o resultado do modelo recalibrado reproduz adequadamente a realidade.

Os intervalos de confiança para a porcentagem de veículos em pelotões foram calculados a partir dos resultados das 30 replicações da simulação. Estipulando-se o nível de confiança como sendo 95%, o intervalo de confiança é dado por $\bar{x} \pm e_0$, em que

$$e_0 = t_{n-1, \alpha/2} \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} \quad (6.1)$$

em que $\bar{x}$: média dos resultados obtidos nas 30 replicações da simulação;
 $s_{\bar{x}}$: desvio padrão dos resultados obtidos nas 30 replicações;
 n : tamanho da amostra (30, no caso); e
 $t_{n-1, \alpha/2}$: valor obtido da distribuição t , para 29 graus de liberdade e 2,5%, respectivamente.

Para o ponto I, na direção Norte-Sul, a média dos valores obtidos para a porcentagem de veículos em pelotões nas 30 replicações da simulação é 22,43% e o desvio padrão da amostra, 1,80%. Assim, o erro e_0 é:

$$e_0 = t_{n-1, \alpha/2} \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} = 2,045 \frac{1,80}{\sqrt{30}} = 0,672\%. \quad (6.2)$$

Assim, o intervalo de confiança para a estimativa da porcentagem de veículos em pelotões referente ao ponto I é 22,43% $\pm$ 0,67% – ou seja, com 95% de confiança, a porcentagem em pelotões gerada pelo simulador para o ponto I varia entre 21,76% e 23,10%. Como o valor observado durante a coleta de dados foi 22,6%, pode-se concluir que o simulador foi capaz de reproduzir adequadamente esta medida de desempenho nesse ponto do trecho.

6.4.1 Porcentagem de veículos trafegando em pelotões

As diferenças entre as porcentagens de veículos trafegando em pelotões obtidas pelo simulador e as coletadas em campo, mostradas na Tabela 6.6 e nos gráficos das Figuras 6.2 (sentido Norte – Sul) e 6.3 (sentido Sul – Norte) apresentam variação irrelevante (menor que 2%) em sete dos dez pontos de coleta de dados; nos demais, a maior diferença encontrada foi 7,6%, que pode ser considerada aceitável. Dos três pontos nos quais a diferença foi superior a 2%, dois correspondem às saídas do trecho estudado. Uma explicação possível para estas diferenças (principalmente a observada no ponto

VII) pode estar relacionada às diferenças encontradas na taxa de ultrapassagens produzida pelo modelo, que foi inferior à observada no campo.

Tabela 6.6: Porcentagem de veículos em pelotões.

<i>Sentido</i>	<i>Pontos</i>	<i>Observada</i>	<i>Modelo recalibrado</i>	<i>Modelo original</i>
<i>Norte – Sul</i>	I	22,6	$22,4 \pm 0,67$	22,7
	II	23,9	$25,1 \pm 0,57$	25,2
	III	28,8	$29,0 \pm 0,67$	26,7
	IV	33,0	$33,6 \pm 0,56$	30,7
	V	30,3	$37,9 \pm 0,65$	32,1
<i>Sul – Norte</i>	VI	30,2	$32,0 \pm 0,88$	29,6
	VII	31,2	$37,1 \pm 0,82$	32,8
	VIII	39,9	$41,1 \pm 0,85$	34,2
	IX	47,3	$46,8 \pm 0,77$	39,0
	X	42,4	$48,0 \pm 0,87$	40,9

Figura 6.2: Comparação entre porcentagens de veículos em pelotões observada e obtidas com o modelo recalibrado e original para o sentido Norte-Sul.

Figura 6.3: Comparação entre percentagens de veículos em pelotões observada e obtidas com o modelo recalibrado e original para o sentido Sul–Norte.

As Figuras 6.2 e 6.3 ilustram a comparação entre os resultados da simulação (modelo original e recalibrado) e os valores observados no trecho. Os retângulos representam o intervalo de confiança da percentagem em pelotões produzida pelo modelo recalibrado; a percentagem em pelotões observada no trecho e produzida pela versão original do modelo também estão mostradas no gráfico.

Pode-se observar que o modelo recalibrado produziu resultados marginalmente superiores aos produzidos pelo modelo original, que gerou quatro pontos com diferença superior a 2% na percentagem de veículos em pelotões. Como pode ser notado na Figura 6.4, as duas versões do modelo reproduziram o comportamento geral observado no trecho – a percentagem de veículos em pelotões cresce na direção em que os veículos viajam. Além disso, a taxa de crescimento da percentagem em pelotões é próxima da observada na rodovia.

Figura 6.4: Comportamento dos pelotões obtido com o modelo recalibrado.

6.4.2 Velocidade média

Com relação às velocidades médias dos veículos no trecho, que estão mostradas na Tabela 6.7, nota-se que as diferenças obtidas entre os valores simulados e os observados para os dois casos (modelo original e modelo recalibrado) foram maiores para os caminhões articulados, cuja velocidade média no trecho foi superestimada em 11,6 km/h pelo modelo original e em 6,6 km/h pelo modelo recalibrado. Essa diferença na velocidade dos caminhões articulados parece ser responsável pela velocidade média da corrente ficar fora do intervalo de confiança de 5%.

Tabela 6.7: Velocidade média dos veículos no trecho (km/h).

<i>Categoria veicular</i>	<i>Observado</i>	<i>Modelo recalibrado</i>	<i>Modelo original</i>
<i>Automóveis</i>	93,7	98,8 $\pm$ 4,80	100,8
<i>Caminhões rígidos</i>	86,5	87,1 $\pm$ 4,29	87,6
<i>Caminhões articulados</i>	84,3	90,9 $\pm$ 3,83	95,9
<i>Corrente única</i>	88,7	95,4 $\pm$ 4,29	97,4

Figura 6.5: Comparação entre as velocidades médias observadas e simuladas.

Ainda que as duas versões do TRARR tendam a superestimar a velocidade média dos veículos no trecho, os resultados do modelo recalibrado estão mais próximos dos valores observados que os produzidos pela versão original do simulador, como pode ser visto na Figura 6.5, que mostra o intervalo de confiança da estimativa da velocidade média de cada categoria de veículos produzida pelo modelo recalibrado.

Figura 6.6: Comparação entre as velocidades para o sentido Norte–Sul.

Figura 6.7: Comparação entre as velocidades para o sentido Sul–Norte.

Analisando-se as velocidades dos veículos de acordo com o sentido de tráfego (Tabela 6.8 e Figuras 6.6 e 6.7), nota-se que, de forma geral, o modelo recalibrado produz velocidades mais próximas às observadas que a versão não recalibrada do modelo.

Tabela 6.8: Velocidade média dos veículos por sentido (km/h).

<i>Categoria veicular</i>	<i>Sentido Norte-Sul</i>			<i>Sentido Sul-Norte</i>		
	<i>Observado</i>	<i>Modelo</i>		<i>Observado</i>	<i>Modelo</i>	
		<i>recalibrado</i>	<i>original</i>		<i>recalibrado</i>	<i>original</i>
<i>Automóveis</i>	93,5	101,5 ± 5,01	103,0	93,9	96,3 ± 4,58	98,9
<i>Caminhões rígidos</i>	87,9	90,9 ± 4,58	90,7	85,2	84,1 ± 4,04	85,2
<i>Caminhões articulados</i>	84,4	93,8 ± 4,22	99,8	84,2	88,9 ± 3,47	92,9
<i>Corrente única</i>	89,2	98,6 ± 4,54	100,1	88,1	92,6 ± 4,04	95,1

6.4.3 Taxa de ultrapassagens

Quanto à taxa de ultrapassagens, a comparação entre os valores observados no trecho e obtidos por meio dos modelos recalibrado e original, exibida na Tabela 6.9, mostra que tanto o modelo recalibrado como o original produzem valores similares aos observados e que os resultados da versão recalibrada foram melhores no sentido Norte-Sul que no sentido oposto.

Tabela 6.9: Taxa de ultrapassagens na rodovia (ultrap/veíc.km).

<i>Sentido</i>	<i>Observado</i>	<i>Modelo recalibrado</i>	<i>Modelo original</i>
<i>Norte – Sul</i>	0,075	0,090 ± 0,003	0,106
<i>Sul – Norte</i>	0,126	0,086 ± 0,003	0,108

Levando-se em consideração as peculiaridades do processo de decisão envolvido na realização de uma ultrapassagem e as dificuldades inerentes à modelagem desse processo, pode-se considerar que o modelo recalibrado é capaz de reproduzir adequadamente o comportamento dos motoristas. Considerando os intervalos de confiança mostrados na Figura 6.8, nota-se que a taxa observada no sentido N-S está abaixo do limite inferior estimado e a do sentido S-N está acima do limite superior, já que nenhuma das duas situa-se dentro do intervalo.

Por outro lado, deve-se ressaltar que o modelo é extremamente sensível com relação às taxas de ultrapassagem – pequenas modificações nos dados de entrada causam amplas variações na taxa de ultrapassagem. Isto significa que o impacto dos parâmetros

Figura 6.8: Comparação entre as taxas de ultrapassagens observadas e simuladas.

comportamentais do modelo – que não foram focalizadas nesta recalibração – deve ser melhor analisado. Esta tarefa é complexa, pois é virtualmente impossível coletar dados empíricos para calibração de parâmetros comportamentais, tanto pela dificuldade de medição como pela variabilidade inerente do comportamento dos motoristas com relação às ultrapassagens. A forma mais viável de recalibração desses parâmetros seria através de uma análise paramétrica, através da qual seria possível fazer ajustes nos valores definidos no arquivo VEHS.

6.5 Considerações sobre a validação do modelo

De um modo geral, pode-se notar que as velocidades médias dos automóveis estimadas pelo modelo são maiores que as observadas em campo, o que pode ser devido ao uso dos dados originais dos veículos australianos. Comparando-se as características desses automóveis, pode-se notar que há semelhanças entre os mesmos, mas várias classes usadas para os veículos de passeio apresentam relações potência/massa maiores que as dos veículos brasileiros. Entretanto, a análise feita no experimento 3 da recalibração (discutido no capítulo anterior) não mostra nenhuma melhora nos resultados quando se modifica os parâmetros mecânicos dos automóveis.

Com relação aos caminhões articulados, as diferenças encontradas na recalibração diminuíram no processo de validação, sendo as velocidades médias observadas menores que as obtidas pela simulação. Isso poderia ser causado pela relação potência/massa adotada (8,47 kW/t), que parece ser mais alta do que a que deve existir em rodovias onde não existe balança. Do ponto de vista do TRARR, o efeito que a variação da relação potência/massa causa na velocidade é muito pequeno, quando todos os demais parâmetros do modelo são mantidos constantes. Entretanto, seria interessante verificar o efeito combinado da variação simultânea desse e de outros parâmetros sobre a velocidade e demais medidas de desempenho.

A porcentagem de veículos em pelotões apresentou pouca diferença entre os valores observado e simulado, sendo que a versão recalibrada mostrou ser marginalmente superior à original. Uma análise mais detalhada dos parâmetros do TRARR que influenciam a formação de pelotões deve ser realizada, para que a recalibração possa ser melhorada quanto a esta medida de desempenho. Por outro lado, os resultados obtidos com a simulação são animadores: o modelo é capaz de reproduzir as características gerais observadas na corrente de tráfego; tanto na rodovia real como na simulada, a porcentagem de veículos em pelotões aumenta do início para o final do trecho – como é natural, já que no trecho em questão não existe um local que permita a dispersão completa dos pelotões, como uma faixa de ultrapassagem.

A taxa de ultrapassagem foi a medida de desempenho para a qual as diferenças entre o modelo e as observações de campo foram maiores, pois nos dois sentidos a taxa de ultrapassagem observada ficou fora do intervalo de confiança da estimativa gerada pelo modelo. As diferenças encontradas podem ser consideradas aceitáveis, considerando-se a complexidade inerente da manobra de ultrapassagem e das decisões tomadas no seu início e final e a dificuldade em criar um algoritmo de simulação capaz de levá-las em consideração.

Das comparações entre os resultados simulados (tanto para o caso do modelo original quanto do modelo recalibrado) com os dados observados em campo, pode-se afirmar que o modelo recalibrado produz resultados satisfatórios e marginalmente melhores que os produzidos pela versão original, indicando que seria apropriado usar a versão recalibrada do TRARR para simular rodovias de pista simples paulistas.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A meta da pesquisa relatada nesta dissertação foi a obtenção de um modelo de simulação de tráfego em rodovias de pista simples, calibrado e adaptado às condições brasileiras e, em particular, às características da frota veicular encontrada no Estado de São Paulo. O modelo escolhido para a recalibração foi o TRARR, versão 4.0, desenvolvido na Austrália pelo ARRB *Transport Research Ltd* (antigo *Australian Road Research Board*).

O trecho escolhido para a recalibração do modelo faz parte da rodovia SP255, que liga Ribeirão Preto a Araraquara. O trecho escolhido está localizado entre os quilômetros 31 e 41 e é formado por uma longa seção em tangente localizada em terreno ondulado, na qual existe uma sucessão de curvas verticais côncavas e convexas, ligadas por rampas de até 5%. Uma cópia do projeto geométrico do trecho foi obtida junto à Divisão Regional de Ribeirão Preto (DR-8) do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, que havia realizado recentemente um levantamento topográfico da rodovia.

Nesse trecho, foram realizadas duas coletas de dados, uma para a recalibração do modelo e outra para a validação do modelo recalibrado. A coleta dos dados usados na recalibração foi realizada num segmento localizado entre duas cristas, de 2800 m de extensão, entre os quilômetros 31 e 33 + 800 m. Os dados usados na validação do modelo recalibrado foram coletados ao longo de todo o trecho, do quilômetro 31 ao quilômetro 41.

Para a recalibração do modelo foram usados dados relativos às características geométricas da rodovia (comprimentos de raios das curvas horizontais, inclinação de rampas, distância de visibilidade, marcação da sinalização horizontal) e às características físicas e mecânicas dos veículos (comprimento, massa, potência).

A recalibração foi feita através da modificação de alguns parâmetros do modelo, que são relativos ao desempenho dos veículos pesados e ao comportamento dos motoristas, que são armazenados no arquivo VEHS do TRARR. Os resultados das simulações realizadas com os novos valores dos parâmetros escolhidos para a recalibração foram comparados com os dados levantados em campo e com resultados da versão original do modelo. O modelo foi considerado recalibrado quando as diferenças entre os resultados da nova versão do simulador e as observações de campo atingiram um mínimo.

A validação do modelo recalibrado foi feita através da comparação de três medidas de desempenho: a velocidade média, a porcentagem de veículos em pelotões e a taxa de ultrapassagens. Para isso, foram coletados dados referente à velocidade média, volume e classificação da corrente de tráfego, porcentagem de veículos em pelotões e o número de ultrapassagens, para cada direção do tráfego, em cinco pontos diferentes do trecho.

O modelo recalibrado foi validado através de comparações entre os dados obtidos em campo e os resultados das simulações. Para as comparações, foram usados as médias e os intervalos de confiança ($\alpha = 5\%$) das estimativas das medidas de desempenho produzidas pelo modelo recalibrado. Das medidas de desempenho escolhidas para a validação, a porcentagem de veículos em pelotões foi a que apresentou menores diferenças entre os valores observados e os produzidos pelo modelo recalibrado.

Com relação à velocidade média, das categorias veiculares usadas (carros, caminhões rígidos e caminhões articulados), tanto o modelo recalibrado como o modelo original tendem a superestimar as velocidades dos veículos. A categoria com a maior diferença foi a dos caminhões articulados. O modelo recalibrado, contudo, foi capaz de produzir velocidades mais próximas das observadas (V_{85}) que o modelo original. As diferenças encontradas podem, no entanto, ser consideradas razoáveis.

A medida de desempenho que apresentou as maiores diferenças entre os valores produzidos pelo simulador e os observados no trecho estudado foi a taxa de ultrapassagens. De certo modo, essas diferenças são compreensíveis, considerando-se a extrema variabilidade no comportamento dos motoristas durante uma ultrapassagem, a complexidade do fenômeno e as dificuldades inerentes em criar um algoritmo de simulação que seja capaz de reproduzir adequadamente na simulação o processo de decisão dos moto-

ristas, seu comportamento e o desempenho do veículo. Tendo-se isso em vista, pode-se considerar que as diferenças encontradas são aceitáveis.

Dadas as restrições de recursos para o desenvolvimento desta pesquisa, uma única variável relacionada com o comportamento de motoristas em pelotões foi analisada na recalibração enquanto que as demais – mais de 30 – não puderam ser estudadas. Uma análise desses parâmetros indica que muitos são virtualmente impossíveis de serem recalibrados sem um suporte efetivo dos autores do modelo. Além disso, no decorrer dos estudos de simulação pôde-se observar que pequenas alterações em parâmetros geométricos da rodovia causavam variações inexplicáveis na taxa de ultrapassagens. Por outro lado, se o simulador for capaz de reproduzir adequadamente a distribuição de velocidades e a porcentagem de veículos em pelotões ao longo da rodovia, pode-se considerar que o simulador é capaz de reproduzir adequadamente o fluxo de veículos e a taxa de ultrapassagens pode ser considerada como uma medida de desempenho secundária.

Assim sendo, pode-se considerar que os resultados obtidos com relação à taxa de ultrapassagens são adequados e que o modelo pode ser considerado validado.

7.1 Conclusões

Do processo de recalibração e validação do modelo, pode-se concluir que

1. De forma geral, a versão recalibrada do modelo TRARR é capaz de representar adequadamente o tráfego numa rodovia de pista simples do Estado de São Paulo, com resultados ligeiramente melhores que os obtidos com o modelo original.
2. Os resultados obtidos indicam que a estratégia adotada na recalibração do modelo de simulação TRARR é adequada e que é possível obter uma versão do modelo capaz de incluir as peculiaridades dos veículos brasileiros na simulação da corrente de tráfego.
3. A classificação adotada para o tráfego, descrita no capítulo 4, é adequada e deve ser usada para caracterização do tráfego dos trechos que serão simulados. Os carros devem ser representados pelas classes 11 a 17; os caminhões rígidos leves pela classe 10; os rígidos pesados, pela classe 4; os caminhões articulados carregados, pela classe 5; e os articulados vazios, pela classe 6. As demais classes podem ser ignoradas.

4. As medidas de desempenho mais importantes são a velocidade média dos veículos e a porcentagem de veículos trafegando em pelotões. A taxa de ultrapassagens deve ser considerada uma medida de desempenho secundária, se o modelo estiver reproduzindo adequadamente a velocidade e a porcentagem de veículos em pelotões.
5. O processo de recalibração deveria ser aprimorado, com novos conjuntos de dados, até que as diferenças encontradas com relação à velocidade dos veículos estivessem dentro de um intervalo de variação suficientemente pequeno.

Considerando-se as restrições de tempo e recursos disponíveis para a realização da pesquisa, pode-se considerar que a meta proposta foi alcançada e que se produziu uma versão do TRARR capaz de simular rodovias de pista simples brasileiras.

7.2 Recomendações

A principal recomendação a ser feita é o aprimoramento da recalibração. Para tanto, novos conjuntos de dados devem ser obtidos e outros parâmetros do TRARR devem ser estudados, a fim de que seja possível refinar os resultados do modelo. Algumas recomendações devem ser feitas com relação à coleta de dados e ao refinamento da recalibração. Quanto à coleta de dados, recomenda-se que:

1. O trecho escolhido deve ser o mais longo possível, de pelo menos 5 km de extensão. Trechos muito curtos podem produzir resultados distorcidos, principalmente com relação à taxa de ultrapassagens.
2. Os dados coletados devem incluir, além do volume e composição do tráfego e geometria da via, as distribuições de velocidades e as porcentagens de pelotões para os pontos-chaves do trecho (entrada e saída) e para pontos intermediários a cada 1000 m. Idealmente, deve-se também coletar o número de ultrapassagens. Deve-se ressaltar que a coleta de dados de ultrapassagens requer um grande número de observadores ao longo do trecho.
3. O levantamento da geometria e sinalização horizontal da via deve ser realizado com a melhor precisão possível, pois exercem influência significativa sobre os resultados do modelo.

4. Deve-se ter em mente que o TRARR foi desenvolvido na Austrália, onde se usa a mão inglesa. Portanto, a codificação da sinalização horizontal deve levar isso em conta, para que os resultados da simulação façam sentido.

Quanto ao refinamento da recalibração do modelo, recomenda-se:

1. Repetir o processo de validação com dados de outros trechos, para confirmação da capacidade do modelo simular adequadamente rodovias do Estado de São Paulo – e, por extensão, do Brasil.
2. Deve-se realizar um estudo mais detalhado da influência dos valores atribuídos à velocidade desejada (VMF) e seu desvio padrão ($VSDF$) na velocidade dos veículos. Existem indicações de que o uso da velocidade correspondente ao percentil 85 (V_{85}) como velocidade desejada possa estar ligada a uma superestimação das velocidades das categorias veiculares.
3. Analisar os efeitos de alguns dos parâmetros usados pelo TRARR para estabelecer o comportamento dos veículos em pelotões, já que a superestimação da velocidade dos caminhões articulados, detectada nesta pesquisa, pode estar relacionada com as discrepâncias encontradas nas taxas de ultrapassagem. Como um estudo dessa natureza deverá necessariamente envolver a variação arbitrária de diversos parâmetros comportamentais do TRARR – numa espécie de “sintonia fina” do modelo –, ele só poderá ser realizado se houver disponibilidade de dados de diversos trechos diferentes, para os quais exista uma variação adequada das características de tráfego e de geometria da via. Do contrário, corre-se o risco de se obter uma versão do modelo capaz de simular adequadamente apenas o trecho estudado e não uma rodovia qualquer.
4. Realizar um estudo mais detalhado da influência dos parâmetros mecânicos dos automóveis na precisão dos resultados. Como os objetivos desta pesquisa incluíam apenas a recalibração dos parâmetros mecânicos dos veículos pesados, a análise realizada com relação aos automóveis (experimento 4) não foi muito detalhada. Para tanto, seria necessário obter dados do desempenho de automóveis e relações potência/massa, pesos e comprimentos típicos para as diversas categorias de automóveis usadas no TRARR.

5. Analisar os efeitos da interação entre o comprimento das zonas de *warm-up* (*DTS1* e *DTS2*) e a porcentagem em pelotões (*PFOL1* e *PFOL2*). As zonas de *warm-up* são segmentos de via com ultrapassagem proibida, colocadas nas extremidades do trecho sendo simulado, para a formação de pelotões. Conforme o próprio manual do TRARR, o estabelecimento do comprimento da zona de *warm-up* adequado para a geração da porcentagem de pelotões desejada é um processo de tentativa e erro. Em função das limitações de tempo e recursos na realização desta pesquisa, não se pôde estudar essas interações tanto quanto seria desejável. A rigor, este aspecto não está relacionado com a recalibração do modelo, mas sim com cada simulação realizada, pois deve-se determinar a combinação *DTS_i* e *PFOL_i* que produza a porcentagem de veículos em pelotões desejada.

ANEXO A :

Variáveis dos arquivos de dados do TRARR

Arquivo TRAF

Neste arquivo há a ressalva de que se não houver a especificação das unidades das variáveis, usar segundos, metros e km/h. As variáveis que fazem parte desse arquivo são apresentadas a seguir, na Tabela A.1.

Tabela A.1: Variáveis do arquivo TRAF.

<i>Variável</i>	<i>Significado</i>
TUN	Tempo básico de simulação
TSE	Tempo necessário para formar e estabilizar a corrente de tráfego.
TSI	Duração da simulação propriamente dita. Note que a execução do programa continua até que todos os veículos que chegaram durante o tempo programado tenham partido.
OPTION	0 - Execução padrão na versão TRARR 4. 1 - Execução padrão na versão TRARR 3.2. 2 - Nesta opção elimina-se a rotina de geração de tráfego e lê no arquivo ITRAF a informação fornecida pelo usuário. Isto pode ser derivado de outros campos de dados, outros modelos ou de uma execução prévia do TRARR. 3 - PASSIGN BAYS, que é uma faixa auxiliar muito curta para caminhões muito lentos, pode ser incorporada com esta opção. Alguns dados extra devem ser fornecidos pelo arquivo PBAYS. 5 - Esta opção gera uma animação na tela mostrando os movimentos dos veículos. 6 - Execução na forma padrão (TRARR 4) porém com atualização dos dados de entrada e saída na tela a cada incremento de tempo.
DTS1	Comprimento adotado antes do início da seção de simulação para gerar os veículos na corrente na direção 1.
DTS2	Comprimento adotado antes do início da seção de simulação para gerar os veículos na corrente na direção 2.
PFOL1	Porcentagem de veículos que chegam em pelotões na direção 1.
PFOL2	Porcentagem de veículos que chegam em pelotões na direção 2.
NSTR	Número de categorias de veículos geradas.
NSEEDO	Semente da sequência de números aleatórios desejada (0 a 999999).
ICHECK	0 – Não há impressão dos arquivos de dados. 1 – Grava os erros nos dados de entrada no arquivo CHKOUT.
ADTV	Proporção dos tipos de veículos para as várias categorias disponíveis. O TRARR admite até 8 categorias veiculares.

ADVGC	Distribuição direcional do tráfego para cada uma das oito categorias de veículos gerados para a corrente de tráfego nas faixas básicas e auxiliares.
VMIT	Volume de tráfego bidirecional para cada um das oito categorias veiculares.
VMF	Velocidade média desejada para cada uma das oito categorias veiculares
VSDF	Desvio padrão das velocidades desejadas para cada uma das oito categorias veiculares.
LFSD	Índices indicativos do tipo de distribuição de velocidade para cada uma das oito categorias veiculares. Esse parâmetro estipula qual o tipo de distribuição de velocidade que será usado nas simulações. 1 – Distribuição normal. 2 – Distribuição log-normal. 3 – Distribuição exponencial. 4 – Distribuição uniforme. 5 à 15 – Distribuição estipulada de acordo com os histogramas de frequências.
PFQ1	Distribuição padrão usada para o fluxo em de veículos em pelotões quando adota-se uma porcentagem de veículos em pelotão (<i>PFOL</i>) igual a -1.

Arquivo VEHS

As características dos veículos e motoristas são especificadas para 18 tipos de veículos, mostrados a seguir na Tabela A.2:

Tabela A.2: Classes de veículos disponíveis no TRARR.

No.	Classe do veículo
1	EXTRAORDINARY VEHICLE – Rodotrem
2	LARGE ROAD TRAIN – Treminhão
3	SMALL ROAD TRAIN – Romeu & Julieta
4	LOW POWERED 38 TONNER – Caminhão pesado
5	HIGH POWERED 38 TONNER – Caminhão pesado
6	UNLOADED ARTIC. TRUCK – Caminhão médio, tipo 12, não carregado
7	BUS – Ônibus
8	4 TONNE TRUCK (LOADED) – Caminhão
9	1 TONNE TRUCK (LOADED) – Caminhão leve
10	SMALL TRUCK – Caminhão leve
11	CAR AND CARAVAN – Carros e sedans
12	UNAGGRESSIVE CAR – Carro “não agressivo” ¹ .
13	LOW POWERED CAR – Carros de baixa potência
14	AVERAGE CAR – Carro médio
15	LARGE CAR – Carro grande
16	AVERAGE CAR – Carro médio
17	AVERAGE CAR – Carro médio
18	SPORTS CAR – Carro esporte

Obs.: 1: A denominação dessa classe de veículo está relacionada com o comportamento do motorista.

A denominação dada aos veículos disponíveis no TRARR foi feita de acordo com as características dos mesmo, principalmente pelo comprimento (para os caminhões) e pela potência (para os carros de passeio). Essas características foram tiradas do próprio arquivo VEHS e foram comparadas com as características dos veículos brasileiros.

Tabela A.3: Variáveis do arquivo VEHS.

<i>Variável</i>	<i>Significado</i>
LIF	Grupo da velocidade desejada.
VOSFN	Fator da velocidade de ultrapassagem quando não há faixa de auxiliar.
VOSFA	Fator da velocidade de ultrapassagem quando há faixa auxiliar.
VHSFN	Fator de velocidade “feliz” quando não há faixa auxiliar.
VHSFA	Fator da velocidade “feliz” quando há faixa auxiliar.
VDE	Desaceleração máxima (como se fosse uma aceleração, mas com valor negativo).
VXA	Aceleração máxima (deve sempre exceder a desaceleração devido ao gradiente).
VNP	Máxima relação potência/peso a ser usada em situações de não-ultrapassagem.
VXP	Máxima relação potência/peso a ser usada em durante as ultrapassagens.
VWRC	Coeficiente de resistência da velocidade devido ao vento, etc.
VLN	Comprimento do veículo.
VFA	Aceleração a ser usada para um veículo lento em pelotão.
VFB	Constante usada na equação de velocidade desejada do veículo para veículo seguidor.
VFDA1	Espaçamento para o veículo a faixa principal quando não se tem a intenção de realizar uma manobra de ultrapassagem.
VFDB1	Tempo para o veículo na faixa principal quando não se tem a intenção de se realizar uma manobra de ultrapassagem.
VFDA2	Espaçamento para o veículo a faixa principal quando há a intenção de se realizar uma manobra de ultrapassagem.
VFDB2	Tempo para o veículo na faixa principal quando há a intenção de se realizar uma manobra de ultrapassagem.
VFDA3	Espaçamento para o veículo na faixa de ultrapassagem, quando não há faixa auxiliar.
VFDB3	Tempo para o veículo na faixa de ultrapassagem, quando não há faixa auxiliar.
VFDA4	Espaçamento para o veículo realizando uma manobra de ultrapassagem onde há uma faixa auxiliar.
VFDB4	Tempo para o veículo realizando uma manobra de ultrapassagem onde há uma faixa auxiliar.
VSHA	Componente fixo de espaçamento da distância mínima desejada entre os veículos em pelotão.
VSHB	Componente temporal da distância mínima desejada entre os veículos em pelotão.
VFDF	Fator para distância entre veículos em pelotão, incrementado a cada segundo.
VFDFC	Fator para distância entre veículos em pelotão do valor de “corte” (máximo fator).
LAG	Número que representa a agressividade do motorista (0 equivale a situação de reali-

	zação de manobra de ultrapassagem somente se houver uma faixa auxiliar).
LAGB	Espera pelo veículo de trás ultrapassar se o seu LAG exceder LAGB. (Se o valor de LAG for maior que LAGB, esse veículo será ultrapassado.)
LAGF	Espera pelo veículo da frente ultrapassar se o seu LAG exceder LAGF.
LBS	Se ultrapassar quando ocupar uma posição além do segundo lugar em um pelotão.
LLA	Se obedecer restrições de ultrapassagens (T = sim, F = não).
LRO	Se realizar ultrapassagens arriscadas.
LUO	Se usar a faixa auxiliar de tráfego oposta.
VTO	O veículo está sendo ultrapassado se outro veículo o alcançar em VTO (s?).
VSFSA	Fator de segurança: a ultrapassagem é restringida pela visibilidade e a faixa auxiliar inicia. Essa restrição termina com o final da faixa auxiliar.
VSFSN	Fator de segurança ultrapassagens restringidas pela visibilidade. Termina normalmente.
VSFVA	Fator de segurança: ultrapassagem restringida pela visualização do veículo na faixa oposta, a faixa auxiliar inicia. Essa restrição termina com o fim da faixa auxiliar.
VSFVN	Fator de segurança: ultrapassagem restringida pela visualização do veículo na faixa oposta. Não há faixa auxiliar.
VSOA	Componente de distância para o espaço a ser deixado após a ultrapassagem (incluindo o comprimento do veículo).
VSOB	Componente temporal para o espaço a ser deixado após a ultrapassagem.
VEXA	O mínimo espaçamento para o qual não há nenhum tempo extra para a ultrapassagem.
VEXB	Tempo extra para ultrapassagem por metro insuficiente de espaçamento, exceto VEXA.
VCLB	Tempo para mudança de faixa quando há um veículo seguindo.
VCLN	Tempo para mudança de faixa quando não há nenhum veículo seguindo.
VAM	Tempo disponível para o retorno para a faixa de tráfego após a ultrapassagem.
VMGA	Componente de distância para o espaçamento disponível de retorno para a faixa de tráfego, considerando o fim da faixa auxiliar.
VMGB	Componente temporal para o tempo disponível de retorno para a faixa de tráfego, considerando o fim da faixa auxiliar.
VTs	Tempo até a estabilização do fluxo depois do retorno para a faixa de tráfego.
VSS	Velocidade abaixo da qual um veículo considera o retorno da faixa auxiliar terminando ou iniciando.
VFE	Se a aceleração de veículos lentos retornando para a faixa de tráfego excede esse valor, não desacelerar.

VFCA	Coefficiente de consumo de combustível por segundo (ml/s).
VFCB	Fator beta1 de eficiência do consumo de combustível (ml/kJ).
VFCC	Fator beta2 de eficiência do consumo de combustível (ml/(kJ*m/s)).
VFCD	Parâmetro da força de arrasto (kN), principalmente relacionada com a resistência de rolamento.
VFCE	Parâmetro da força de arrasto (kN/(m/s)), principalmente relacionada com a resistência aerodinâmica.
VFCF	Massa do veículos (kg*1000).
VFCG	Fator multiplicativo para a resistência de rolamento de acordo com o índice de velocidade.
SMX	Máxima velocidade presumida para um veículo saindo do campo de visão.
CIOV	Constante usada na decisão de qual veículo ser tratado como oposto
SMN	Velocidade mínima de viagem para todos os veículos: crítica no momento de retorno a faixa de tráfego.
XMFH	Headway médio entre veículos em pelotão (para uso futuro).
VFCH	Combustível usado pelos veículos: gasolina (P) ou diesel (D).

Arquivo ROAD

Nesse arquivo são definidos os parâmetros que vão caracterizar a rodovia.

Tabela A.4: Variáveis do arquivo ROAD.

<i>Variável</i>	<i>Significado</i>
DSS	Comprimento de rodovia simulado (m).
DENDS	O ponto final do comprimento de rodovia simulado (m).
DUR	Comprimento unitário da rodovia sobre o qual as características da rodovia são uniformes. Usa-se, em geral, 100 m.
NURD	Número de unidades da rodovia e é igual a DSS/DUR.
Desired 85%ile speed	Velocidade do 85º percentil desejada.
Bendiness	Grau de curvatura por unidade de distância (graus/km).
Chainage	Pontos do trecho de rodovia simulado.
Barrier lines	Marcação dos trechos onde é permitida ou proibida as manobras de ultrapassagem. Valor 1 quando não existe nenhuma restrição e -1, caso contrário.
Auxiliary lanes	Existência de faixas auxiliares para a realização das manobras de ultrapassagens. Quando há faixas, marcar T, caso contrário, F.
Road speed indices	Índices multiplicadores de velocidade. Valores tirados do arquivo MULTIP.
Sight distance	Distância de visibilidade de frenagem (m). Marcado para cada ponto em cada sentido da faixa.
Grade	Inclinação da rampa. Aclives recebem valor positivo e declives, negativo.
Curve radius	Raio da curva horizontal (m). Para trechos retos, considerar como sendo uma curva de raio infinito, dando o valor 9999.
85%ile	Velocidade correspondente ao 85º percentil.
Comments	Comentário.

Arquivo OBS

No arquivo OBS serão definidos os pontos de observação de cada simulação de acordo com as seguintes variáveis, descritas na Tabela A.5.

Tabela A.5: Variáveis do arquivo OBS.

<i>Variável</i>	<i>Significado</i>
NOB	Número de pontos de observação.
NOB1	Número de pontos de observação na direção 1.
LMSP	Ponto inicial para observação na direção 1 e na direção 2.
LMFP	Ponto final para observação na direção 1 e na direção 2.
NCT	Número de categorias de veículos observado.
TFOL	Intervalo de tempo (<i>gap</i>) máximo entre veículos para ser considerado em pelotão.
DFOL	Distância máxima entre veículos (<i>spacing</i>) para ser considerado em pelotão.
IFILE	Esta opção fornece várias opções de saída de dados adicionais. Varia de 0 a 5. Opção 0 = Saída de dados padrão. Opção 1 = Fornece a distribuição de frequências das velocidades, número de ultrapassagens e tamanho dos pelotões. Opção 2 = Características dos veículos que passam em cada ponto de observação, incluindo o tempo de viagem e taxas de ultrapassagens dos veículos que passam no fim dos pontos de observação. Opção 3 = Fornece apenas as características dos veículos que passam no fim dos pontos de observação. Opção 4 = Fornece informações sobre a posição, o tempo e a faixa para todos os veículos a cada unidade de tempo, para uma posterior apresentação gráfica. Opção 5 = Fornece informações sobre o consumo de combustível, posição, tempo, velocidade e aceleração para cada unidade de tempo.
LVC	Classificação de cada tipo de veículos numa das categorias definidas.

ANEXO B :

Exemplos de listagem dos arquivos de dados do
TRARR

Arquivo TRAF

TEST1.TRF

WHERE NOT SPECIFIED UNITS ARE IN SECONDS, METRES AND KM/H.

1.0 BASIC TIME UNIT FOR THE SIMULATION (TUN)
 1800.0 SETTLING DOWN TIME FOR THE SIMULATION (TSE)
 14400.0 DURATION OF THE SIMULATION (TSI); NOTE THAT THE PROGRAM KEEPS
 RUNNING UNTIL ALL VEHICLES WHICH ARRIVED IN THIS TIME HAVE
 DEPARTED.
 0 OPTION: 0=TRARR4; 1=STANDARD; 2=USE ITRAF; 3=USE PBAYS;
 5=GRAFIC DISPLAY; 6=TIME DISPLAY;
 100.0 LENGTH OF NO OVERTAKING TO CREATE BUNCHING IN DIRECTION 1 (DTS1)
 100.0 LENGTH OF NO OVERTAKING TO CREATE BUNCHING IN DIRECTION 2 (DTS2)
 22.6 PERCENT FOLLOWING IN PLATOONS ON ARRIVAL IN DIRECTION 1 (PFOL1)
 30.2 PERCENT FOLLOWING IN PLATOONS ON ARRIVAL IN DIRECTION 2 (PFOL2)
 NOTE ZERO %FOLL GIVES RANDOM ARRIVALS; NEG %FOLL USES DEFAULTS.
 3 NUMBER OF VEHICLE GENERATION CATEGORIES (NSTR); CHECK FORMATS IN
 THIS FILE IF NSTR IS CHANGED. ONLY NSTR OF THE COLUMNS BELOW
 ARE READ.
 717673.0 RANDOM SEED NUMBER (NSEED0); RANGE IS 0. TO 999999.
 0 ICHECK: 1=PRINT INPUT DATA TO FILE CHKOUT FOR CHECKING; 0=NO CHECK

THE REMAINING PARAMETERS DESCRIBE THE SIMULATED TRAFFIC STREAM

ADTV: PROPORTIONS OF VEHICLE TYPES IN VARIOUS CATEGORIES

 * TRAFFIC GENERATION CATEGORIES * TYPE *

AUTOS	RIGIDS	ARTICS	LTRUCK	HTRUCK	EXTRA1	EXTRA2	EXTRA3	*	TYPE	*
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	1	*
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	2	*
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	3	*
0.	0.58	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	4	*
0.	0.	0.44	0.	0.	0.	0.	0.	*	5	*
0.	0.	0.56	0.	0.	0.	0.	0.	*	6	*
0.	0.03	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	7	*
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	8	*
0.08	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	9	*
0.	0.39	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	10	*
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	11	*
0.06	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	12	*
0.03	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	13	*
0.40	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	14	*
0.05	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	15	*
0.23	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	16	*
0.15	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	17	*
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	*	18	*

ADVGC: PROPORTION OF FLOW IN EACH LANE AND DIRECTION

0.4779	0.4367	0.4122	0.	0.	0.	0.	0.	DIR1	BASIC LANE
0.0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.		AUX. LANE
0.5221	0.5633	0.5878	0.	0.	0.	0.	0.	DIR2	BASIC LANE
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.		AUX. LANE

VMIT: TWO-DIRECTIONAL TRAFFIC VOLUME (VEH/H) FOR EACH CATEGORY

244.0	79.0	37.0	0.	0.	0.	0.	0.
-------	------	------	----	----	----	----	----

VMF: MEAN DESIRED SPEED (KM/H)

109.2	99.8	95.5	0.	0.	0.	0.	0.
-------	------	------	----	----	----	----	----

VSDF: STANDARD DEVIATION OF DESIRED SPEEDS (KM/H)

13.4	12.0	10.7	0.	0.	0.	0.	0.
------	------	------	----	----	----	----	----

LFSD: INDICES INDICATING TYPE OF SPEED DISTRIBUTION

1	1	1	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

PFQ1: DEFAULT PLATOONING-FLOW DISTRIBUTION USED WHEN PFOL IS INPUT AS -1

0.	200.	400.	800.	1200.	1600.	2000.	2800.
0.	15.	30.	50.	65.	75.	90.	100.

FILE VEHS

ROW 1:

ROW 2:

```

10  SMALL TRUCK
11  CAR AND CARAVAN
12  UNAGGRESSIVE CAR
13  LOW POWERED CAR
14  AVERAGE CAR
15  LARGE CAR
16  AVERAGE CAR
17  AVERAGE CAR
18  SPORTS CAR

```

1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	2	3	3	3	3	3	4

VFA: ACCELERATION TO BE USED FOR SMOOTH FOLLOWING BEHAVIOUR

.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50	.50
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

VFB: (REL. SPEED)/(DIST. TO BE MADE UP) FOR SMALL FOLL. DEVIATIONS

.10	.10	.10	.10	.10	.15	.15	.10	.10
.15	.10	.10	.15	.15	.15	.15	.15	.15

VFDA1: DISTANCE SPACING FOR BASIC LANE WHEN NOT THINKING OF OVERTAKING

2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

VFDB1 TIME SPACING

2.00	1.50	1.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	.70
.90	3.00	3.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

VFDA2: DISTANCE SPACING WHEN IN BASIC LANE, CONSIDERING OVERTAKING

2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

VFDB2 TIME SPACING

2.00	1.50	1.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	.70
.90	.70	1.00	.40	.50	.50	.50	.50	.30

VFDA3: DISTANCE SPACING FOR OVERTAKING LANE WHERE THERE IS NO AUX. LANE

5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

VFDB3: TIME SPACING IN SAME SITUATION

3.00	2.00	2.00	.70	.70	.70	.90	.70	.70
.70	1.00	1.30	.70	.70	.70	.70	.70	.60

VFDA4: DIST. SPACING WHEN IN OVERTAKING LANE WHERE THERE IS AN AUX. LANE

5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

VFDB4: TIME SPACING

4.50	2.50	2.50	1.00	1.00	1.00	1.30	1.00	1.00
1.00	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

VSHA: FIXED DISTANCE COMPONENT OF MINIMUM DESIRED FOLLOWING DISTANCE

.80	.80	.80	.80	.80	.80	.80	.80	.80
.80	.80	.80	.80	.80	.80	.80	.80	.80

VSHB: TIME COMPONENT OF FOLLOWING SPACE WHEN HASSLED

1.00	.50	.50	.20	.20	.20	.40	.20	.20
.20	.50	.50	.20	.20	.20	.20	.20	.20

VFDF: FOLLOWING DISTANCE FACTOR (PER SECOND)

.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
.00	.005	.01	.01	.01	.01	.01	.01	.015

VFDFC: FOLLOWING DISTANCE FACTOR CUTOFF VALUE (MAXIMUM FACTOR)

1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.60	2.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	5.00

LAG: AGGRESSION NUMBER (0 = ONLY OVERTAKES WHERE THERE IS AN AUX. LANE)

3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	6	3	3	8

LAGB: WAIT FOR VEHICLE BEHIND IF ITS AGGRESSION NUMBER EXCEEDS THIS

7	7	7	7	7	7	7	7	7
7	5	4	7	7	7	7	7	10

LAGF: WAIT FOR VEHICLE IN FRONT IF ITS AGGRESSION NUMBER EXCEEDS THIS

4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	9	4	4	9

F	T	T	T	T	T	T	T	T
T	T	F	T	T	T	T	T	T

T	T	T	T	T	T	T	T	T
F	T	T	T	F	F	T	T	F

F	F	F	F	F	T	F	F	F
T	F	F	T	T	T	T	F	T

F	T	T	T	T	T	T	T	F
T	T	F	T	T	T	F	T	T

[illegible]

2.00	2.00	1.80	1.60	1.60	1.60	2.00	1.60	1.60
1.60	1.80	2.50	1.50	1.70	1.70	2.00	1.40	1.40

2.00	2.00	1.80	1.60	1.60	1.60	2.00	1.60	1.60
1.60	1.80	2.50	1.50	1.70	1.70	2.00	1.40	1.40

2.20	2.20	2.00	1.80	1.80	1.80	2.20	1.80	1.80
1.80	2.00	2.70	1.70	1.90	1.90	2.20	1.60	1.60

2.00	2.00	1.80	1.60	1.60	1.60	2.00	1.60	1.60
1.60	1.80	2.50	1.50	1.70	1.70	2.00	1.40	1.40

70.00	60.00	35.00	20.00	20.00	20.00	15.00	10.00	10.00
10.00	20.00	13.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

.20	.20	.20	.20	.20	.20	.20	.20	.20
.20	.20	.20	.30	.30	.30	.30	.30	.30

100.00	80.00	65.00	45.00	45.00	45.00	40.00	30.00	30.00
30.00	40.00	35.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	15.00

[illegible][illegible][illegible][illegible]

VMGA: DISTANCE COMPONENT OF END-OF-AUX.-LANE MERGING DISTANCE ALLOWED

50.00	50.00	30.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
20.00	50.00	20.00	30.00	20.00	20.00	10.00	30.00	20.00	

VMGB: TIME COMPONENT OF SAME

10.00	10.00	10.00	8.00	8.00	8.00	8.00	5.00	6.00	
7.00	5.00	3.00	8.00	4.00	4.00	2.00	6.00	4.00	

VTs: TIME UNTIL SETTLE AFTER MERGING

30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	10.00	30.00	30.00	
30.00	10.00	10.00	30.00	30.00	30.00	20.00	40.00	30.00	

VSS: SPEEDS FOR WHICH END-OF-AUXILIARY-LANE MERGING IS STOP-START

5.00	5.00	5.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	
10.00	14.00	14.00	10.00	10.00	10.00	13.00	7.00	10.00	

VFE: IF ACCELERATION FOR SMOOTH MERGING EXCEEDS THIS, DO NOT DECELERATE

-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	
-1.00	-.80	-.50	-1.00	-1.00	-1.00	-1.20	-.80	-.50	

VFCA: FUEL CONSUMPTION PER SECOND WHEN IDLING (ML/S)

1.75	1.50	1.29	.87	1.17	.87	.56	.43	.54	
.48	.40	.30	.20	.15	.65	.50	.40	.60	

VFCB: FUEL CONSUMPTION EFFICIENCY FACTOR BETA1 (ML/KJ)

.07	.07	.07	.07	.07	.07	.07	.07	.08	
.08	.08	.09	.10	.13	.07	.09	.10	.11	

VFCC: FUEL CONSUMPTION EFFICIENCY FACTOR BETA2 (ML/(KJ.M/S)))

.02	.02	.02	.02	.02	.02	.01	.01	.02	
.02	.05	.06	.05	.07	.04	.03	.06	.05	

VFCD: DRAG FORCE PARAMETER (KN), MAINLY RELATED TO ROLLING RESISTANCE

12.77	10.62	7.24	3.57	3.57	2.16	1.18	.92	.41	
.39	.50	.28	.30	.33	.40	.30	.35	.25	

VFCE: DRAG FORCE PARAMETER (KN/(M/S))), MAINLY RELATED TO AEROD. RESIST.

6.00	5.20	4.70	4.30	4.30	2.50	2.10	2.00	1.10	
1.00	1.60	.80	1.20	1.80	1.40	1.00	1.10	.80	

VFCF: VEHICLE MASS (KG*1000)

150.00	115.50	79.00	38.00	38.00	17.00	12.00	7.80	2.50	
2.00	2.50	.80	1.10	.95	1.65	1.40	1.20	1.10	

VFCG: MULT. FACTOR FOR ROLLING RESISTANCE ACCORDING TO ROAD SPEED INDEX

1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

SMX	CIOV	RTUHN	SMN	XMFH	XMIPH	MPS
30.00	.80	10.00	1.00	1.8	4.0	35

VFCH: VEHICLE USES (P)ETROL) OR (D)IESEL

D	D	D	D	D	D	D	D	P
P	P	P	P	P	P	P	P	P

#EOF

Arquivo ROAD

TEST1.ROD

DSS	DENDS	DUR	NURD	DESIRED	85%ILE	SPEED	BENDINESS			
11000.00	1000.00	100.00	110		104.6		73.8			
CHAINAGE	BARRIER	AUXILIARY	ROAD	SIGHT	DISTANCE	GRADE	CURVE RADIUS	85%ILE	COMMENTS	
KM	LINES	LANES	SPEED	M	M	(DIR 1)	M	SPEED		
	(1 OR -1)	(T OR F)	INDICES			UP +VE		KMH		
7.0	1	1	F F 253 253	340.00	110.00	-2.05	9999	104.6		
7.1	1	1	F F 253 253	220.00	169.00	-3.05	9999	104.6		
7.2	1	1	F F 253 253	169.00	280.00	-0.50	9999	104.6		
7.3	1	1	F F 257 257	170.00	389.00	-1.05	480	96.0		
7.4	1	1	F F 260 260	349.00	159.00	-0.90	290	89.3		
7.5	1	1	F F 255 255	250.00	179.00	0.85	780	100.3		
7.6	1	1	F F 253 253	160.00	259.00	1.85	9999	104.6		
7.7	1	1	F F 253 253	149.00	350.00	2.10	9999	104.6		
7.8	1	1	F F 258 258	120.00	130.00	0.35	400	93.7		
7.9	1	1	F F 264 264	119.00	119.00	-0.55	160	79.5		
8.0	1	1	F F 264 264	139.00	120.00	-0.60	150	79.5		
8.1	1	1	F F 258 258	79.00	159.00	-0.75	430	93.7		
8.2	1	1	F F 285 285	119.00	79.00	-4.25	160	79.9		
8.6	1	1	F F 261 261	100.00	130.00	-2.25	260	87.0		
16.6	1	1	F F 253 253	310.00	889.00	-1.00	9999	104.6		
16.7	1	1	F F 253 253	220.00	989.00	-0.65	9999	104.6		
16.8	1	1	F F 254 254	159.00	1090.00	-0.60	1850	102.4		
16.9	1	1	F F 259 259	180.00	319.00	-0.05	350	91.4		
17.0	1	1	F F 259 259	529.00	159.00	-0.70	340	91.4		
17.1	1	1	F F 255 255	420.00	189.00	-1.35	890	100.3		
17.2	1	1	F F 253 253	319.00	269.00	-0.65	9999	104.6		
17.3	1	1	F F 253 253	219.00	360.00	-0.30	9999	104.6		
17.4	1	1	F F 253 253	440.00	450.00	0.75	2500	104.6		

Arquivo OBS

FILE OBS

```

20      NOB      NUMBER OF OBSERVATION POINTS
10      NOB1     NUMBER OF OBSERVATION POINTS IN DIRECTION 1

      1      LMSP  INTERVAL STARTING POINT DIRECTION 1
11      LMSP  INTERVAL STARTING POINT DIRECTION 2

10      LMFP  INTERVAL FINISHING POINT DIRECTION 1
20      LMFP  INTERVAL FINISHING POINT DIRECTION 2

      2      NCT   NUMBER OF VEHICLE OBSERVATION CATEGORIES

4.0     TFOL   TIME COMPONENT OF DEFINITION OF FOLLOWING
0.0     DFOL   DISTANCE COMPONENT OF DEFINITION OF FOLLOWING

      0      IFILE OPTION TO GENERATE ADDITIONAL OUTPUT INFORMATION

```

VEHICLE CATEGORY NAMES

1=TRUCKS ;2=CARS ;3= ;4= ;5= ;6= .

VEHICLE CATEGORIES FOR THE VARIOUS VEHICLE TYPES (LVC)

1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2

OBSERVATION POINTS FOR FIRST DIRECTION (RELATIVE TO START OF SIM. SEGMENT)

1100. 2200. 3300. 4400. 5500. 6600. 7700. 8800. 9900.10900.

OBSERVATION POINTS FOR SECOND DIRECTION (FROM START OF SIM. SEG. IN DIR 2)

1100. 2200. 3300. 4400. 5500. 6600. 7700. 8800. 9900.10900.

#EOF

Arquivo OUT

SIM18.TRF AND sp255.ROD COMBINATION (TRARR 4.0)

TRAFFIC PARAMETERS SPECIFIED AT INPUT:

TIME OF SIMULATION = 14400.0
 SETTLING DOWN TIME = 1800.0
 RANDOM SEED NUMBER = 175909.0

% FOLLOWING, DIRECTION 1 = 22.6
 % FOLLOWING, DIRECTION 2 = 30.2

STREAM	DIR1 FLOW (VEH/H)	DIR2 FLOW (VEH/H)	TOTAL
AUTOS	92.0	168.0	260.0
RIGID	60.0	64.0	124.0
ARTICS	12.0	24.0	36.0
TOTAL	164.0	256.0	420.0

ACTUAL FLOWS - DIRECTION 1: 156. VEH/H
 - DIRECTION 2: 235. VEH/H
 - COMBINED: 390. VEH/H
 ACTUAL COMPLETION TIME: 14744. SEC
 MAXIMUM NUMBER OF VEHICLES ON ROAD: 72

**** DIRECTION 1 ****

POINT OBSERVATIONS: POSITIONS MEASURED FROM START IN DIRECTION OF TRAVEL

POSITION M	OVERTAKINGS COMMENCED	SPEED (KM/H)		%FOLL	NUMBER	MEAN SPEED BY CATEGORY		
		MEAN	S.D.			1	2	3
200.	0	99.5	12.8	26.0	622	102.6	96.5	87.4
400.	12	102.6	13.1	28.0	622	103.5	103.4	88.0
1200.	23	96.0	13.6	31.8	622	101.2	89.2	86.7
3000.	54	100.3	14.0	33.9	622	100.7	101.7	86.8
3500.	26	95.5	13.3	34.4	622	99.1	89.3	99.4
5300.	40	100.9	13.7	37.8	622	102.0	101.3	87.8
5800.	17	94.5	13.8	39.1	622	98.4	88.4	95.4
7600.	59	94.0	13.3	41.8	622	97.7	88.0	94.5
8400.	12	92.9	13.2	43.9	622	96.4	87.5	92.5
8600.	0	92.5	13.2	44.4	622	95.8	87.4	92.1

* INTERVAL OBSERVATIONS BETWEEN 200.M AND 8600.M (8400.M)

VEHICLE CATEGORY	TRAVEL TIME		JOURNEY SPEED		%TIME SPENT	OVERTAKINGS		PETROL	DIESEL	NO.	
	MEAN SEC	S.D. SEC	MEAN KM/H	S.D. KM/H	FOLL.	NO. OF	NO. BY	RATE BY	CONS. ML	CONS. ML	
AUTOS	310.9	34.6	98.5	10.9	41.8	117	249	.083	1322.3	.0	359
UNITS	339.4	38.9	90.2	10.2	40.7	186	63	.033	1080.0	3555.2	228
ARTICS	333.0	29.1	91.4	7.5	42.5	20	11	.037	.0	3642.6	35
ALL	322.6	38.5	95.1	11.2	41.4		323	.062	1275.0	3572.6	622

**** DIRECTION 2 ****

POINT OBSERVATIONS: POSITIONS MEASURED FROM START IN DIRECTION OF TRAVEL

POSITION M	OVERTAKINGS COMMENCED	SPEED (KM/H)		%FOLL	NUMBER	MEAN SPEED BY CATEGORY		
		MEAN	S.D.			1	2	3
200.	0	96.5	13.3	30.9	938	99.3	88.8	97.3
400.	32	97.7	13.6	32.4	938	100.8	89.5	98.0
1200.	63	97.2	13.4	36.2	938	100.5	88.6	97.4
3000.	164	96.2	13.5	38.5	938	100.1	87.6	92.1
3500.	25	93.1	15.2	41.2	938	99.0	81.0	83.1
5300.	193	96.3	13.1	40.5	938	99.0	88.8	97.5
5800.	42	96.1	14.0	40.0	938	99.4	87.6	95.8
7600.	134	98.9	13.5	49.6	938	99.8	100.2	88.3
8400.	52	92.9	13.4	51.9	938	96.6	85.9	85.3
8600.	0	91.0	13.8	51.7	938	95.0	83.1	83.4

* INTERVAL OBSERVATIONS BETWEEN 200.M AND 8600.M (8400.M)

VEHICLE CATEGORY	TRAVEL TIME		JOURNEY SPEED		%TIME SPENT FOLL.	OVERTAKINGS		PETROL RATE CONS.	DIESEL CONS.	NO.
	MEAN SEC	S.D. SEC	MEAN KM/H	S.D. KM/H		NO. OF	NO. BY			
AUTOS	317.7	34.4	96.3	10.3	43.8	401	902 .173	1518.7	.0	619
UNITS	369.6	41.4	82.8	8.9	39.6	514	75 .038	1716.2	4989.5	237
ARTICS	345.1	32.6	88.4	8.2	42.2	103	41 .060	.0	5225.5	82
ALL	333.2	42.6	92.2	11.4	42.6	1018	.129	1542.8	5072.5	938

* INTERVAL INFORMATION FOR BOTH DIRECTIONS COMBINED *
(ASSUMES MATCHING LENGTHS OF 8400.M)

VEHICLE CATEGORY	TRAVEL TIME		JOURNEY SPEED		%TIME SPENT FOLL.	OVERTAKINGS		PETROL RATE CONS.	DIESEL CONS.	NO.
	MEAN SEC	S.D. SEC	MEAN KM/H	S.D. KM/H		NO. OF	NO. BY			
AUTOS	315.2	34.6	97.1	10.6	43.1	518	1151 .140	1446.6	.0	978
UNITS	354.8	42.9	86.4	10.2	40.2	700	138 .035	1396.2	4296.9	465
ARTICS	341.5	32.0	89.3	8.1	42.3	123	52 .053	.0	4751.9	117
ALL	329.0	41.3	93.3	11.4	42.1	1341	.102	1439.0	4427.1	1560

** FREE SPEED DISTRIBUTIONS: DESIRED SPEEDS IGNORE ROAD CHARACTERISTICS;
UNIMPEDED SPEEDS TAKE ACCOUNT OF ROAD SPEED INDICES, BUT NOT GRADES OR
TRAFFIC.

VEHICLE CATEGORY	DESIRED SPEED		UNIMPEDED SPEED		NUMBER
	MEAN	S.D.	MEAN	S.D.	
AUTOS	104.3	12.7	104.9	12.8	978
UNITS	91.5	11.7	95.4	12.2	465
ARTICS	103.7	8.1	99.9	7.8	117
ALL	100.4	13.4	101.7	13.0	1560

Arquivo MULTIP

Este arquivo contém os multiplicadores de velocidade, num total de 630 valores correspondentes a 3 incrementos na inclinação das rampas (0, 5%, 7%), 10 incrementos nos valores de *bendiness* (0, 15, 30, 50, 70, 95, 120, 150, 200 e 250) e 21 incrementos nos raios das curvas horizontais (9999, 1500, 900, 650, 510, 410, 340, 290, 250, 215, 185, 160, 140, 120, 105, 95, 85, 75, 65, 55 e 45). Aqui será apresentado somente uma parte deste arquivo.

SPEED MULTIPLIER TABLE FOR TRARR

1	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
2	0.92422	0.94874	0.96821	0.96591
3	0.87210	0.91647	0.93875	0.93445
4	0.80921	0.88983	0.91065	0.90457
5	0.76530	0.86671	0.88421	0.87656
6	0.72783	0.84357	0.85632	0.84714
7	0.69716	0.82205	0.82949	0.81893
8	0.67212	0.80265	0.80480	0.79308
9	0.64956	0.78371	0.78043	0.76764
10	0.62741	0.76006	0.75459	0.74077
11	0.60610	0.73258	0.72804	0.71326
12	0.58619	0.70698	0.70187	0.68625
13	0.56846	0.68423	0.67724	0.66093
14	0.54866	0.65887	0.64415	0.62704
15	0.53207	0.63766	0.61679	0.59915
16	0.51996	0.62222	0.59705	0.57909
17	0.50683	0.60549	0.57586	0.55762
18	0.49244	0.58721	0.55290	0.53445
19	0.47650	0.56698	0.52778	0.50917
20	0.45854	0.54424	0.49989	0.48122
21	0.43786	0.51813	0.46833	0.44974

609	0.77657	0.73435	0.70638	0.69613
610	0.89559	1.00879	0.99924	0.99920
611	0.89142	0.99243	0.99340	0.99307
612	0.88784	0.98074	0.98725	0.98662
613	0.88430	0.97018	0.98063	0.97969
614	0.88075	0.96031	0.97364	0.97237
615	0.87671	0.94971	0.96537	0.96372
616	0.87247	0.93918	0.95645	0.95439
617	0.86819	0.92909	0.94731	0.94484
618	0.86358	0.91869	0.93731	0.93441
619	0.85819	0.90709	0.92556	0.92216
620	0.85205	0.89447	0.91214	0.90818
621	0.84531	0.88126	0.89747	0.89292
622	0.83835	0.86823	0.88246	0.87733
623	0.82935	0.85215	0.86332	0.85749
624	0.82067	0.83736	0.84524	0.83877
625	0.81360	0.82577	0.83081	0.82386
626	0.80517	0.81240	0.81396	0.80647
627	0.79495	0.79680	0.79406	0.78598
628	0.78231	0.77829	0.77028	0.76154
629	0.76629	0.75589	0.74140	0.73192
630	0.74534	0.72807	0.70561	0.69534

ANEXO C :

Resultados dos experimentos de simulação

Resultados obtidos com os experimentos de simulação

Neste anexo serão apresentados os resultados analisados, obtidos com os experimentos de simulação realizados tanto no procedimento de recalibração quanto na validação do modelo. Os resultados representam a média aritmética das 30 replicações de cada experimento realizado e são: fluxo de tráfego; velocidade média e desvio padrão da velocidade média de cada categoria de veículos no trecho simulado; taxa de ultrapassagens; velocidade média e desvio padrão da velocidade de cada categoria de veículos por sentido de tráfego e a porcentagem de veículos em pelotões em cada sentido de tráfego. O TRARR fornece outros resultados mas que não foram analisados neste trabalho.

a. Fluxo de tráfego

O modelo TRARR gera o fluxo de tráfego e o divide de acordo com as categorias de veículos observadas. Neste estudo foram observadas três categorias: automóveis (autos), caminhões unitários (units) e caminhões articulados (artics). A corrente única é a soma dos fluxos de todas as categorias observadas. Os resultados simulados estão apresentados na Tabela C.1.

Tabela C.1: Fluxo de tráfego observado e simulado.

<i>Experimento</i>	<i>Fluxo de tráfego (veíc/h)</i>			
	<i>Automóveis</i>	<i>Caminhões unitários</i>	<i>Caminhões Articulados</i>	<i>Corrente única</i>
0 e 1				
1 categoria	264	120	38	422
2 categorias	261	124	36	421
3 categorias	261	124	36	421
2				
<i>headway</i> = 3,0 s	261	124	36	421
<i>headway</i> = 4,0 s	261	124	36	421
<i>headway</i> = 5,0 s	261	124	36	421
3	261	124	36	421
4	261	124	36	421
5	261	124	36	421
6	261	124	36	421
<i>Valores observados</i>	260	124	36	420

b. Velocidade média ao longo do trecho simulado

O TRARR fornece o valor da velocidade média e do respectivo desvio padrão para cada categoria de veículos gerada ao longo do trecho de rodovia simulado, considerando as duas direções de tráfego. Os resultados simulados estão mostrados na Tabela C.2 e C.3.

Tabela C.2: Velocidade média observada e simulada.

<i>Experimento</i>	<i>Velocidade média (km/h)</i>			
	<i>Automóveis</i>	<i>Caminhões unitários</i>	<i>Caminhões articulados</i>	<i>Corrente única</i>
0 e 1				
1 categoria	101,2	95,6	97,0	99,2
2 categorias	97,6	88,0	89,4	94,1
3 categorias	98,1	88,4	96,2	95,1
2				
<i>headway</i> = 3,0 s	98,1	88,4	96,2	95,1
<i>headway</i> = 4,0 s	98,1	88,4	96,2	95,1
<i>headway</i> = 5,0 s	98,1	88,4	96,2	95,1
3	98,3	87,7	96,0	95,0
4	98,5	87,7	96,0	95,1
5	97,8	88,0	89,7	94,2
6	96,5	87,9	89,5	93,3
<i>Valores observados</i>	102,9	86,1	84,6	95,4

Tabela C.3: Desvio padrão da velocidade média observado e simulado.

<i>Experimento</i>	<i>Desvio padrão da velocidade média (km/h)</i>			
	<i>Automóveis</i>	<i>Caminhões unitários</i>	<i>Caminhões articulados</i>	<i>Corrente única</i>
0 e 1				
1 categoria	12,3	11,6	11,0	12,3
2 categorias	12,8	10,8	10,7	12,9
3 categorias	12,7	10,7	10,9	12,8
2				
<i>headway</i> = 3,0 s	12,7	10,7	10,9	12,8
<i>headway</i> = 4,0 s	12,7	10,7	10,9	12,8
<i>headway</i> = 5,0 s	12,7	10,7	10,9	12,8
3	12,6	10,2	10,7	12,7
4	12,5	10,2	10,7	12,7
5	12,5	10,2	8,1	12,5
6	12,5	10,2	8,1	12,2
<i>Valores observados</i>	14,3	9,5	8,4	12,2

c. Taxa de ultrapassagens

A taxa de ultrapassagens é obtida da relação entre o número de veículos ultrapassados pelo total de veículos observados e pela extensão do trecho simulado. O levantamento desse parâmetro em campo depende da observação das ultrapassagens ao longo do trecho estudado, o que acaba causando uma certa imprecisão nos dados coletados devido à dificuldade que se tem ao se estudar um trecho muito extenso, pois nem sempre é possível visualizar com nitidez todos os pontos da rodovia. Os resultados simulados estão apresentados na Tabela C.4.

Tabela C.4: Taxa de ultrapassagens.

<i>Experimento</i>	<i>Taxa de ultrapassagens (veíc/veíc.km)</i>	
	<i>Sentido N-S</i>	<i>Sentido S-N</i>
0 e 1		
1 categoria	0,072	0,124
2 categorias	0,087	0,147
3 categorias	0,084	0,140
2		
<i>headway</i> = 3,0 s	0,084	0,140
<i>headway</i> = 4,0 s	0,084	0,140
<i>headway</i> = 5,0 s	0,084	0,140
3	0,084	0,143
4	0,087	0,147
5	0,084	0,146
6	0,063	0,115
<i>Valores observados</i>	0,068	0,104

d. Velocidade média por sentido de tráfego

O TRARR fornece o valor da velocidade média e o respectivo desvio padrão para cada categoria de veículos observada por sentido de tráfego (sentido N-S e sentido S-N). Os resultados simulados estão apresentados nas Tabela C.5 até C.8.

Tabela C.5: Velocidade média observada e simulada no sentido N-S.

<i>Experimento</i>	<i>Velocidade média (km/h)</i>			
	<i>Automóveis</i>	<i>Caminhões unitários</i>	<i>Caminhões articulados</i>	<i>Corrente única</i>
0 e 1				
1 categoria	101,8	95,7	97,2	99,6
2 categorias	97,8	87,4	89,5	93,4
3 categorias	98,3	87,8	96,4	94,3
2				
headway = 3,0 s	98,3	87,8	96,4	94,3
headway = 4,0 s	98,3	87,8	96,4	94,3
headway = 5,0 s	98,3	87,8	96,4	94,3
3	98,3	87,0	96,1	94,0
4	98,4	87,0	96,1	94,1
5	97,7	87,2	90,1	93,3
6	96,9	87,1	90,0	92,8
<i>Valores observados</i>	113,8	92,4	93,3	104,0

Tabela C.6: Desvio padrão da velocidade média observado e simulado no sentido N-S.

<i>Experimento</i>	<i>Desvio padrão da velocidade média (km/h)</i>			
	<i>Automóveis</i>	<i>Caminhões unitários</i>	<i>Caminhões articulados</i>	<i>Corrente única</i>
0 e 1				
1 categoria	12,0	12,0	10,6	12,2
2 categorias	12,5	11,0	10,6	12,8
3 categorias	12,5	10,8	10,6	12,8
2				
headway = 3,0 s	12,5	10,8	10,6	12,8
headway = 4,0 s	12,5	10,8	10,6	12,8
headway = 5,0 s	12,5	10,8	10,6	12,8
3	12,4	10,2	10,4	12,6
4	12,3	10,2	10,4	12,6
5	12,4	10,2	8,3	12,4
6	12,4	10,2	8,3	12,3
<i>Valores observados</i>	17,1	11,5	9,1	14,7

Tabela C.7: Velocidade média observada e simulada no sentido S-N.

<i>Experimento</i>	<i>Velocidade média (km/h)</i>			
	<i>Automóveis</i>	<i>Caminhões unitários</i>	<i>Caminhões articulados</i>	<i>Corrente única</i>
0 e 1				
1 categoria	100,8	95,6	96,8	98,9
2 categorias	97,5	88,5	89,3	94,5
3 categorias	98,1	88,9	96,0	95,6
2				
headway = 3,0 s	98,1	88,9	96,0	95,6
headway = 4,0 s	98,1	88,9	96,0	95,6
headway = 5,0 s	98,1	88,9	96,0	95,6
3	98,4	88,3	96,0	95,6
4	98,6	88,3	96,0	95,8
5	97,8	88,8	89,5	94,8
6	96,3	88,6	89,2	93,7
<i>Valores observados</i>	92,1	79,7	75,9	86,7

Tabela C.8: Desvio padrão da velocidade média observado e simulado no sentido S-N.

<i>Experimento</i>	<i>Desvio padrão da velocidade média (km/h)</i>			
	<i>Automóveis</i>	<i>Caminhões unitários</i>	<i>Caminhões articulados</i>	<i>Corrente única</i>
0 e 1				
1 categoria	12,4	11,4	11,3	12,2
2 categorias	12,9	10,6	10,9	12,9
3 categorias	12,8	10,6	11,0	12,7
2				
headway = 3,0 s	12,8	10,6	11,1	12,7
headway = 4,0 s	12,8	10,6	11,1	12,7
headway = 5,0 s	12,8	10,6	11,0	12,7
3	12,7	10,2	10,8	12,7
4	12,6	10,1	10,8	12,7
5	12,6	10,1	7,9	12,4
6	12,5	10,1	7,9	12,2
<i>Valores observados</i>	11,6	7,4	7,7	9,6

e. Porcentagem de veículos em pelotões

A porcentagem de veículos em pelotões é relativa à quantidade de veículos que viajam com *headway* menor que 5,0 s. Os valores estimados nas simulações realizadas no processo de recalibração do modelo estão apresentados nas Tabelas C.9 e C.10.

Tabela C.9: Porcentagem de veículos em pelotões no sentido N-S.

<i>Experimento</i>	<i>Porcentagem de veículos em pelotões</i>			
	<i>Pontos observados</i>			
	I	II	III	IV
0 e 1				
1 categoria	30,8	35,2	34,7	36,5
2 categorias	31,6	37,0	36,0	37,8
3 categorias	31,2	36,4	36,1	37,7
2				
<i>headway</i> = 3,0 s	27,4	30,2	29,1	30,2
<i>headway</i> = 4,0 s	28,8	34,2	33,2	34,7
<i>headway</i> = 5,0 s	31,2	36,4	36,1	37,7
3	31,1	36,4	35,6	36,9
4	31,1	36,4	35,6	36,8
5	31,2	36,3	35,4	37,0
6	31,3	37,6	36,5	39,2
<i>Valores observados</i>	26,8	25,4	27,0	26,5

Tabela C.10: Porcentagem de veículos em pelotões no sentido S-N.

<i>Experimento</i>	<i>Porcentagem de veículos em pelotões</i>			
	<i>Pontos observados</i>			
	I	II	III	IV
0 e 1				
1 categoria	43,9	46,8	50,1	49,6
2 categorias	44,8	46,3	49,4	49,1
3 categorias	45,0	46,6	50,0	49,4
2				
<i>headway</i> = 3,0 s	39,9	37,6	41,1	40,7
<i>headway</i> = 4,0 s	42,9	43,2	46,3	46,3
<i>headway</i> = 5,0 s	45,0	46,6	50,0	49,4
3	44,8	46,4	49,7	48,9
4	44,7	46,2	49,6	48,8
5	44,6	45,8	48,9	48,4
6	46,4	47,8	50,4	51,2
<i>Valores observados</i>	47,4	47,1	43,7	44,6

ANEXO D:

Modelos de planilhas para coleta de dados

Modelos de planilhas para coleta de dados

Neste anexo serão apresentados os modelos das planilhas usadas nas coletas de dados, uma para a contagem e classificação do tráfego (página 131) e outra a contagem das manobras de ultrapassagens (página 132) realizadas no trecho observado.

Ambas as planilhas possuem o mesmo cabeçalho com campos destinados a:

1. A identificação do ponto de observação e das condições da rodovia (seca, úmida, bem conservada etc);
2. A descrição das condições do tempo (nublado, ensolarado, seco etc);
3. A data e horário de início e fim do período de coleta de dados;
4. A identificação do observador responsável pela coleta;
5. A numeração das páginas da planilha para organização dos dados;
6. A identificação da faixa de tráfego observada (sentido do fluxo de tráfego);
7. Os comentários e observações relevantes à coleta (realização de manutenção no trecho, ocorrência de acidentes etc); e
8. A identificação dos intervalos de coleta de dados (qual o período em que os dados coletados são agregados).

A classificação dos veículos é feita segundo sete tipos de veículos: automóvel, utilitário (veículos utilitários leves);caminhonete (veículos utilitários pesados); rígido leve (caminhões rígidos leves); rígido pesado (caminhões rígidos pesados); articulado (caminhões articulados) e ônibus. Um oitavo campo denominado “outros” é destinado à identificação de outros tipos de veículos que não se encaixam em nenhuma das classes anteriormente citadas. Para a contagem dos veículos estipula-se um ponto de referência na rodovia e, assim que os veículos passam por ele, são contados e classificados.

A contagem das manobras de ultrapassagens realizadas é feita para cada faixa de tráfego da rodovia, dentro de um trecho pré-selecionado. Para cada trecho deve-se encontrar um ponto onde visualização da rodovia e dos veículos é máxima. Geralmente, esse ponto está localizado no meio do trecho para rodovias em tangente e nos extremos para trechos com variação de inclinação. Entretanto, nem sempre é possível encontrar um ponto em que a visualização é completa, o que acaba gerando imprecisão nos dados coletados, pois podem ocorrer manobras em trechos não visíveis.

As manobras de ultrapassagens realizadas no trecho foram divididas em dois tipos: manobras simples e manobras múltiplas. As manobras simples são aquelas em que

um veículo ultrapassa somente um veículo. As manobras múltiplas são aquelas em que um veículo ultrapassa mais de um veículo. Apesar dessa distinção, para o cálculo da taxa de ultrapassagens, o que importa é o número de veículos ultrapassados no trecho.

Foi criado um sistema de contagem somente para o registro das manobras múltiplas, já que para as simples não existe problema. Para cada manobra múltipla realizada, contava-se o número de veículos ultrapassados pelo veículo ultrapassador. Por exemplo, observa-se que um veículo ultrapassa, seguidamente, um pelotão de 3 veículos. Na planilha, o observador irá marcar o número 3, que é equivalente a 3 ultrapassagens simples.

Para um pelotão de veículos ultrapassando, o sistema de contagem é parecido, mas agora é registrado, para cada veículo do pelotão ultrapassador, o número de veículos ultrapassados. Por exemplo, observa-se que um pelotão de 3 veículos ultrapassa um outro pelotão de 2 veículos. Na planilha, no campo destinado às ultrapassagens múltiplas, o observador irá marcar 2+2+2, o que significa que houveram 3 ultrapassagens duplas, e é equivalente a 6 ultrapassagens simples.

[illegible]

b. Planilha para contagem das manobras de ultrapassagem

<i>Universidade de São Paulo/ Escola de Engenharia de São Carlos/ Departamento de Transportes</i>			
ESTUDO SOBRE MANOBRAS DE ULTRAPASSAGEM			
Ponto de observação: <i>P4</i>		Data: <i>04/07/00</i>	Página: <i>1</i>
Condições da rodovia: <i>Boa</i>	Horário da coleta Início: <i>12:00</i> Fim: <i>16:00</i>		Observador: <i>Márcia</i>
Condições do tempo: <i>Ensolarado</i>	Observações/ Comentários:		
<i>Sentido de tráfego: Ribeirão Preto - Araraquara</i>			
Períodos		Ultrapassagens	
Início	Fim	Simples	Múltiplas
<i>11:55</i>	<i>12:00</i>	☐ <i>4</i>	 <i>0</i>
<i>12:00</i>	<i>12:10</i>	☒ ☐ <i>8</i>	☐ <i>2</i>
<i>12:10</i>	<i>12:20</i>	☐ <i>3</i>	 <i>0</i>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AERDE, M. V. (1998) INTEGRATION Release 2.10: User's Guide-Volume I: Fundamental Model Features. Blacksburg, Virginia, 64p.
- AERDE, M. V.; YAGAR, S. (1983) Volume Effects on Speeds of 2-Lane Highways in Ontario. Compendium of Technical Papers – ITE, p.301-313.
- ANDREWS, B.; LIEBERMAN, E. B.; SANTIAGO, A. J. (1987) The NETSIM Graphics System. *Transportation Research Record*, n.1112, p.124-131.
- ANFAVEA (1999) Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. <http://www.anfavea.com.br> (04 Feb 00).
- ARCHILLA, R.; MORRAL, J. (1996) Traffic Characteristics on Two-Lane Highway Downgrades. *Transportation Research-A*, v.30, n.2, p.119-133.
- BACON, V. W.; LOVELL, D. J.; MAY, A. D.; AERDE, V. M. (1994) Use of INTEGRATION Model to Study High-Occupancy-Vehicle Facilities. *Transportation Research Record*, n.1446, p.8-13.
- BAUER, T.; MEDEMA, M. P.; JAYANTHI, S. V. (1995) Testing of Light Rail Signal Control Strategies by Combining Transit and Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record*, n.1494, p.155-160.
- BLOOMBERG, L. *et al.* (1998) Capacity and level of service analysis of freeway systems. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Highway Capacity*, DRD/TRB, Copenhagen, p. 155–180.
- BOTHA, J. L.; ZENG, X.; SULLIVAN, E. C. (1993) Comparison of Performance of TWOPAS and TRARR Models When Simulating Traffic on Two-Lane Highways with Low Design Speeds. *Transportation Research Record*, n.1398, p.7-16.

- BOTMA, H. (1986) Traffic Operation on Busy Two-lane Rural Roads in the Netherlands *Transportation Research Record*, n.1091, p.126-131.
- BOTMA, H.; FI, I. (1991) Traffic operation on 2-lane roads in Hungary and the Netherlands *Highway Capacity and Level of Service*, número da revista, p41-53.
- BOTTERILL, R. (1997) Improvement and Implementation of Road User Costs Models: Recalibration of TRARR. Victoria – Australia, ARRB.
- CHEN, Q.; STAUSS, H. J. (1997) Evaluating traffic of a route guidance system by dynamic simulation. *Simulation Practice and Theory*, v.5, n.7-8, p.793-804, Out.
- COHEN, S. L.; CLARK, J. (1987) Analysis of Freeway Reconstruction Alternatives Using Traffic Simulation. *Transportation Research Record*, n.1132, p.8-13.
- COLLINS, k. M.; KRAMMES, R. A. (1996) Preliminary Validation of a Speed-Profile Model for Design Consistency Evaluation. *Transportation Research Record*, n.1523, p.11-21, nov.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT (1997) Pesquisa Rodoviária CNT – 1997. <http://www.cnt.org.br/index40.htm> (20 Set 99).
- COSTA NETO, P.L.O. (1985) *Estatística*. São Paulo, Edgard Blücher.
- DEMARCHI, S. H. (1995) Influência dos Veículos Pesados na Capacidade de Interseções Rodoviárias. São Carlos. 164p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DEMARCHI, S. H.; SETTI, J. R. A. (1999) Caracterização da relação massa/potência de caminhões em rodovias do Estado de São Paulo. In: XIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, São Carlos, 1999. Anais. v.1, p.573-584.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1993). Manual de Sinalização Rodoviária. V.1. São Paulo.
- DER-SP (1993) Manual de Sinalização Rodoviária. v.1, *Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo*.
- DHN - Digital Home Network (1998) NC-97 Manual de Operação. *Digital Home Network*, São Paulo.
- ELEFTERIADOU, L.; TORBIC, D.; WEBSTER, N. (1997) Development of Passenger Car Equivalents (PCE) for Freeways, Two-Lanes Highways and Arterials. *Transportation Research Board / 76th Annual Meeting / Washington, D.C..*
- ENBERG, A.; PURSULA, M. (1991) Traffic flow and level of service on high-class two-lane roads in Finland. *Highway Capacity and Level of Service*, p.119-126.

- ENBERG, A.; PURSULA, M. (1996) Traffic Flow Characteristics on a Three-Lane Rural Highway in Finland. *Transportation Research Record*, n.1572, p.33-42, nov.
- GARCIA, C. M. (1993) Relaciones Densidad, Intensidad, Velocidad en Vías Suburbanas de Ciudades Venezolanas. In: XII CONGRESO MUNDIAL IRF, Madri, 1993. *Anais*. Madri, Editora. v.4, p.561-570.
- GEIPOT (1998) Anuário Estatístico dos Transportes. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasília, DF. <http://www.geipot.gov.br/anuario98/indez.html> (20 Set 99).
- GERLOUGH, D. L.; HUBER, M. J. (1975) Traffic Flow Theory – A monograph, Special Report 165, *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 222p.
- GUELL, D. L.; VIRKLER, M. R. (1988) Capacity Analysis of Two-Lane Highways. *Transportation Research Record*, n.1194, p.199-205.
- HARWOOD, D. W. (1991) Researchs needs on the operational effectiveness of passing lanes on two-lane highways. *Highway Capacity and Level of Service*, p.151-162.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (1965) *Highway Capacity Manual - 1965*. Special Report 87. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- HOBAN, C. J.; SHEPHERD, R. J.; FAWCETT, G. J.; ROBINSON, G. K. (1991) *A Model for Simulating Traffic on Two-Lane Rural Roads – User Guide and Manual for TRARR Version 3.2*. Victoria - Australia, ARRB.
- HU, P. S.; WRIGHT, T.; ESTEVE, T. (1998) Traffic Count Estimates for Short-Term Traffic Monitoring Sites. *Transportation Research Record*. n.1625, p.26-34.
- HU, T.; MAHMASSANI, H. S. (1995) Evolution of Network Flows Under Real-Time Information: Day-to-Day Dynamic Simulation Assignment Framework. *Transportation Research Record*. n.1493, p.46-56.
- JOUBERT, H. S. (1990) Interpretation of Traffic Density as Measure of Level of Service. *Compendium of Technical Papers – ITE*, p.220-223.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. (1991) *Simulation Modeling & Analysis*. New York, McGraw-Hill, Inc.
- MACHADO NETO, E. F. (1995) Influência dos Veículos Pesados na Capacidade de Rodovias de Pista Simples. São Carlos. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- MACHADO NETO, E. F.; SETTI, J. R. A (1998) O Problema da Sobrecarga na Operação de Veículos Pesados em Rodovias Brasileiras. In: TRANSPORTE EM TRANSFORMAÇÃO, Makron Books/Confederação Nacional do Transporte. São Paulo, Cap. 5, p.94-117.
- MCLEAN, J. R. (1983) Using simulation to investigate mathematical traffic flow relationships. In: *Papers for Workshop on Rural Traffic Flow*, ARRB, Melbourne, Austrália, p. 179-193.
- MCLEAN, J. R. (1989) *Two-Lane Highway Traffic Operations – Theory and Practice*. New York, Gordon and Breach Science Publishers.
- MESSER, C. (1983) Two-lane, two-way rural highway capacity. Final Report Project NCHRP 3-28A, Texas Transportation Institute, Texas A&M University.
- MORRAL, J.; MILLER Jr., E.; SMITH, G. A; FEUERSTEIN, J.; YAZDAN, F. (1995) Planning and Design of Passing Lanes Using Simulation Model. *Journal of Transportation Engineering*, v.121, n.1, p.50-62.
- NU-METRICS (1997) NC-97 Manual. Uniontown, PA – U.S.A. - Nu-Metrics Customer Service Dept.
- POLUS, A ;CRAUS, J.; LIVNEH, M. (1991) Flow and Capacity Characteristics on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record*, n.1320, p.128-134.
- PRIGOGINE, I.; HERMAN, R. (1971) *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. New York: American Elsevier.
- RATHI, A. K.; LIEBERMAN, E. B.; YEDLIN, M. (1987) Enhanced FREFLO: Modeling of Congested Environments. *Transportation Research Record*. n.1112, p.61-71.
- ROBINSON, G.K. (1980) *A Model for Simulating Traffic on Two-Lane Rural Roads*. Victoria - Australia, ARRB.
- SETTI, J. R. A (1994) *Introdução à Simulação Discreta de Sistemas*. São Carlos. EESC.
- SHEPHERD, R. (1994) *TRARR 4 User Manual*. Victoria - Australia, ARRB.
- SILVEIRA, A. (1996) Aplicação do Modelo TRARR na Simulação de Tráfego em Via Rural. In: X ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Brasília, 1996. Anais. v.2, p.633-642.
- TARAGIN, A (1946) Effect of Length of Grade on Speed of Motor Vehicles. In: 25th ANNUAL MEETING OF THE HIGHWAY RESEARCH BOARD, 1946. *Proceedings*. p.342-353.

- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1985) *Highway Capacity Manual - 1985*. Special Report 209. National Research Council, Washington, D.C.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1994) *Highway Capacity Manual 3d edition*. Special Report 209. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- VASCONCELOS, E.A. (1982) Pesquisas e levantamentos de tráfego. *Boletim técnico CET*, 31. Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, 184p.
- VERMIJS, R. (1998) New Dutch capacity standards for freeway weaving sections based on micro simulation. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Highway Capacity*, Danish Road Directorate/TRB, Copenhagen, p. 1065–1080.
- WATANATADA, T.; HARRAL, C. G.; PATERSON, W. D. O., DHARESHAWAR, A M., BHANDARI, A ; TSUNOKAWA, K. (1987) The Highway Design and Maintenance Standards Model. *World Bank Publication*. Washington D. C. – USA, Cap. 5, p.149-199.
- WEBSTER, N.; ELEFTERIADOU, L. (1999) A simulation study of truck passenger car equivalents (PCE) on basic freeway sections. *Transportation Research Part B*, n.33, p.323-336.
- WOLHUTER, K. M.; POLUS, A. (1988) Uniform Delay Approach to Warrants for Climbing Lanes. *Transportation Research Record*, n.1195, p.101-110.
- YAGAR, S. (1983) Capacities for Two-Lane Highways. *Australian Road Research*, p.3-9.
- YANG, Q. (1997) A simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems. Cambridge. 193p., Dissertação (PhD) - Massachusetts Institute of Technology. <http://hippo.mit.edu/products/simlab/main.html> (20 Set 99).