JOSÉ ELIEVAM BESSA JÚNIOR

**MEDIDAS DE DESEMPENHO PARA
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SERVIÇO EM
RODOVIAS DE PISTA SIMPLES NO BRASIL**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Área: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. José Reynaldo Anselmo Setti

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B557a Bessa Júnior, José Elievam
Avaliação de medidas de desempenho para rodovias de
pista simples no Brasil / José Elievam Bessa Júnior;
orientador José Reynaldo Anselmo Setti. São Carlos,
2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2015.

1. Medidas de desempenho. 2. Rodovias de pista
simples. 3. Simulação de tráfego. 4. Algoritmo
genético. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ ELIEVAM BESSA JÚNIOR.**

Título da tese: "Medidas de desempenho para avaliação da qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil"

Data da defesa: 30/03/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **José Reynaldo Anselmo Setti**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Profa. Dra. **Cira Souza Pitombo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Manoel Mendonça de Castro Neto**
(Universidade Federal do Ceará/UFC)

APROVADO

Prof. Dr. **Felipe Issa Kabbach Junior**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Profa. Dra. **Maria Alice Prudêncio Jacques**
(Universidade de Brasília/UnB)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

“O correr da vida embrulha tudo.
A vida é assim: esquentada e esfria,
aperta e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem”.

Guimarães Rosa

Aos meus pais, Fátima e Elievan,
pelo amor e pelo incentivo em minha vida e na
conclusão deste trabalho, além da alegria nos
olhos e nas ações, mesmo nas dificuldades.

À minha esposa, Sofia, pilar que me
sustenta em todos os momentos, inclusive
no desenvolvimento desta pesquisa.

À minha filha, Laura, meu maior presente,
pelo seu amor e pela sua compreensão.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao meu bom Deus, primeiramente, e à Espiritualidade Maior pela força de todos os dias.

À *minha família*, em especial à minha esposa, *Sofia*, pelo amor e pelo incansável suporte; à minha filha, *Laura*, que, mesmo tão pequena, entende os momentos que vivemos longe em prol de um grande objetivo; aos meus pais, *Fátima* e *Elievan*, pelo amor e pelo esforço para nos dar, a mim e aos meus irmãos, uma educação sólida; aos meus irmãos *Felipe* e *Juliana*, pelo companheirismo de sempre; à minha sogra, *Ângela*; à minha avó *Mazinha*; aos meus tios e tias; aos meus primos e primas; e tantos outros.

Ao Prof. *José Reynaldo Setti*, pelos anos de orientação desafiadora e pela amizade que desenvolvemos.

Ao Prof. *Scott S. Washburn*, do *Transportation Research Center (TRC)* da *University of Florida* (UF), pelo acolhimento e pela orientação durante meu estágio de pesquisa nos EUA.

Aos grandes amigos que fiz em São Carlos, *Helenice Sacht*, *Vitor Meneguetti*, *Tatiana Renata*, *Ana Elisa*, *Juliana Moretti*, *Mário Pelissari*, *Fernando Almeida*, *Jéssica Silva* e muitos outros. Aos companheiros de sala, *André Cunha*, *Diogo Colella*, *Francisco Arcelino*, *Gustavo Riente*, *Karla Cristina*, *Fernando Piva*, *Artur Piatti* e *Felipe Bethonico*, pela ajuda em diversos momentos.

Aos funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Transportes (STT) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), pelos valiosos anos de convívio.

Aos colegas do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), pela ajuda e compreensão na conclusão desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro sob a forma de bolsas de doutorado e de estágio de pesquisa no exterior. À Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) e às concessionárias Nascentes das Gerais, Intervias, Colinas, Renovias, ViaOeste e Rodovias do Tietê pelo apoio nas coletas de dados de tráfego em campo.

Para todos aqueles que contribuíram de alguma forma, tanto para a realização desta pesquisa como para a minha formação como cidadão, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

BESSA JR., J. E. **Medidas de desempenho para avaliação da qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil**. 2015. 127p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

Para estimar o nível de serviço em rodovias de pista simples, o *Highway Capacity Manual* 2010 (HCM2010) adota como medidas de desempenho a Porcentagem de Tempo Viajando em Pelotões (*PTSF*) e a Velocidade Média de Viagem (*ATS*). A *PTSF*, no entanto, é praticamente impossível de ser obtida de observações em campo. Na literatura, algumas pesquisas propõem medidas de desempenho alternativas que podem ser coletadas diretamente da observação do tráfego. A meta deste trabalho consistiu em avaliar e propor medidas de desempenho que pudessem ser adequadas para descrever a qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil. Foi utilizado um conjunto de dados de tráfego coletados em diversas rodovias no estado de São Paulo para calibrar e validar o simulador de tráfego escolhido, o CORSIM, a partir de um Algoritmo Genético (AG). Com o simulador recalibrado, foi gerado um conjunto de dados sintéticos, para diversas condições de geometria viária e composição de tráfego. Com esses dados sintéticos, foram produzidos modelos teóricos para estimar a *PTSF* a partir de dados de tráfego que seriam “observáveis em campo”: a porcentagem de veículos em pelotões (*PF*); o modelo proposto por Pursula (1995); o modelo de Laval (2006); o criado por Polus e Cohen (2009); e um modelo polinomial baseado na *PF* e outras variáveis. As estimativas obtidas com esses modelos divergiram significativamente da *PTSF* produzida pelo CORSIM, sugerindo a necessidade de substituir a *PTSF* por uma outra medida de desempenho. Assim sendo, nove medidas de desempenho alternativas foram estudadas. Usando dados de tráfego sintéticos produzidos com o CORSIM, foram desenvolvidos modelos que relacionavam medidas de desempenho alternativas com o fluxo de tráfego unidirecional. Comparações dos valores provenientes dessas relações com dados de campo indicaram que três medidas de desempenho (a velocidade média de viagem dos automóveis; a densidade para automóveis e a densidade de veículos em pelotões) poderiam ser usadas para propor critérios para estimar o nível de serviço em rodovias de pista simples no Brasil.

Palavras-chave: Medidas de desempenho; Rodovias de pista simples; Simulação de tráfego; Algoritmo genético.

ABSTRACT

BESSA JR., J. E. **Measures of effectiveness for quality of service evaluation on two-lane rural highways in Brazil**. 2015. 127p. Thesis (PhD) – University of São Paulo, São Carlos School of Engineering. São Carlos, Brazil, 2015.

The Highway Capacity Manual 2010 uses Percent-Time-Spent Following (*PTSF*) and Average Travel Speed (*ATS*) to estimate level of service on two-lane rural highways. As it is almost impossible to observe *PTSF* directly in the field, the literature suggests alternative measures of effectiveness (MOEs) that can be obtained from traffic stream parameters. The objective of this thesis was to analyze MOEs that could adequately describe quality of service on two-lane rural highways in Brazil. Traffic data collected on several roads in the state of São Paulo were used to calibrate and validate the traffic simulation model CORSIM, using a Genetic Algorithm (GA). The recalibrated CORSIM was used to create a synthetic set of traffic data, comprising a wide range of traffic flows and road geometries. Using this synthetic data, several models relating *PTSF* to “directly observable” traffic parameters were developed: percent following (*PF*), as in the HCM2010; the shockwave theory model proposed by Pursula (1995); the Laval (2006) moving bottleneck model; the Polus and Cohen (2009) queueing model; and a polynomial model. *PTSF* estimates produced by these models significantly diverged from *PTSF* values produced by CORSIM, suggesting the need for a new measure of effectiveness. Thus, nine alternative MOEs were analyzed and models relating these MOEs to directional traffic flow were fitted, using the synthetic traffic data set. Comparisons between the values obtained from these models and from the field indicated that three MOEs (average travel speed of cars, density for cars and follower density) could be used to create level of service criteria for two-lane rural highways in Brazil.

Keywords: Measures of effectiveness; Two-lane rural highways; Traffic simulation; Genetic algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Critério para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples de classe I [TRB, 2000].....	11
Figura 2.2:	Método para estimativa do nível de serviço para rodovias de pista simples de classe I do HCM2010.....	13
Figura 2.3:	Efeito da faixa adicional na velocidade média de viagem [Mon-Ma, 2008, adaptado do HCM2000].....	16
Figura 2.4:	Efeito da faixa adicional na porcentagem de tempo viajando em pelotões [Mon-Ma, 2008, adaptado do HCM2000].....	16
Figura 2.5:	Critério para determinação do nível de serviço em trechos onde o relevo é plano, com sinuosidade menor ou igual a 67 graus/km e com PHV variando entre 0% (curva de cima) e 20% (curva de baixo) [FGSV, 2005]	20
Figura 2.6:	Dados de campo da FD e do fluxo de tráfego para uma rodovia de classe I [ODOT, 2014]	27
Figura 2.7:	Método para obter os volumes de serviço de cada nível de serviço com base em <i>PD</i> a partir do critério do HCM2010, com destaque para obter o intervalo que determina o nível de serviço A [Li e Washburn, 2014]	34
Figura 2.8:	Vantagens e desvantagens das medidas de desempenho estudadas	36
Figura 3.1:	Dados de fluxo e velocidade unidirecionais (a) e bidirecionais (b) observados em campo por meio de filmadoras em trabalhos anteriores	40
Figura 3.2:	Conjunto para filmagem do tráfego: câmera + tripé [Harwood et al., 1999]	41
Figura 3.3:	Etapas da montagem do equipamento para realização de filmagens de tráfego	42
Figura 3.4:	Equipamento para realização de filmagens de tráfego	43
Figura 3.5:	Pontos fluxo-velocidade unidirecionais (a) e bidirecionais (b) obtidos em campo com filmadoras em trabalhos anteriores e nesta pesquisa (SP-123, SP-300, SP-308 e SP-270)	45
Figura 3.6:	Pontos fluxo-velocidade unidirecionais (a) e bidirecionais (b) obtidos em campo com filmadoras na SPA-110/330 e em outras estradas em regime não congestionado e congestionado	48

Figura 3.7: Aplicação da análise de cluster para determinar a velocidade na capacidade das correntes de tráfego unidirecionais (a) e bidirecionais (b) da SPA-110/330.....	49
Figura 3.8: Correntes de tráfego unidirecionais (a) e bidirecionais (b) coletadas em regime não congestionado	49
Figura 3.9: Distribuição de frequência das correntes de tráfego bidirecionais selecionadas ...	50
Figura 3.10: Distribuição de frequência das correntes de tráfego unidirecionais selecionadas .	51
Figura 3.11: Correntes de tráfego bidirecionais selecionadas (a) com metade para calibrar o CORSIM e outra metade para validar o simulador e os modelos de tráfego em capítulos subsequentes (b)	51
Figura 3.12: Série histórica dos volumes de tráfego no sensor do km 89, SP-270, em abril de 2010	54
Figura 3.13: Pontos fluxo-velocidade da SP-55, km 214, durante a aplicação da análise de cluster em um dos sentidos (a) e após a aplicação (b).....	55
Figura 3.14: Relações massa/potência dos veículos com perfil de velocidade versus a população de caminhões observados na balança, de acordo com a categoria: leves (a), médios (b), pesados (c) e extrapesados (d).....	57
Figura 3.15: Exemplo de perfil vertical estimado a partir de dados de GPS (SP-123).....	58
Figura 3.16: Exemplo de perfil vertical estimado a partir de dados de GPS (SP-123).....	59
Figura 4.1: Fluxograma do programa utilizado na calibração automática do CORSIM.....	65
Figura 4.2: Exemplo de crossover feito a partir de máscara aleatória	66
Figura 4.3: Segmento usado para calibração do modelo de desempenho do CORSIM.....	74
Figura 4.4: Pontos fluxo-velocidade unidirecionais antes (a) e após a calibração (b) em comparação com os dados obtidos em campo para o conjunto de dados usados na calibração do CORSIM.....	78
Figura 5.1: Representação do fenômeno estudado: (a) Diagrama fundamental do tráfego; e (b) diagrama espaço-tempo [adaptado de Laval (2006)]	83
Figura 5.2: Exemplo de obtenção das variáveis Q_0 e N_0 para um trecho hipotético.....	86
Figura 5.3: Comparação entre valores da PTSF obtidos com o CORSIM e estimados por: (a) PF, como sugerido pelo HCM; (b) pelo modelo sugerido por Pursula (1995);	

(c) pelo modelo de Cohen e Polus (2011); (d) pelo modelo de Laval (2006); e	
(e) com o novo modelo proposto neste trabalho	90
Figura 6.1: Método de avaliação das medidas de desempenho	95
Figura 6.2: Resultados da análise de sensibilidade conduzida para encontrar o conjunto de boas soluções do AG. Simulações com o TWOPAS para: (a) 15%; (b) 50%; (c) 85%; ou (d) 100% das melhores soluções [Bessa Jr. e Setti, 2011a]	98
Figura 6.3: Relações fluxo-velocidade obtidas a partir de dados sintéticos para $RF \leq 20$ m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$, $P_{hv} = 0\%$ e $FFS = 80$ km/h: (a) côncava; e (b) linear	106
Figura 6.4: Medidas de desempenho obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) velocidade média de viagem (a); (b) atraso percentual; e (c) densidade	108
Figura 6.5: Modelos obtidos a partir de dados sintéticos para $RF \leq 20$ m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$ e $P_{hv} = 0\%$ para encontrar as medidas de desempenho: (a) densidade de veículos em pelotões; (b) porcentagem de veículos em pelotões; (c) porcentagem de veículos retidos; (d) número médio de veículos em pelotões; e (e) número médio de veículos fora dos pelotões	111
Figura 6.6: Medidas de desempenho obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) densidade de veículos em pelotões; (b) porcentagem de veículos em pelotões; (c) porcentagem de veículos retidos; (d) tamanho médio dos pelotões; (e) intensidade do tráfego; e (f) liberdade do fluxo	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Critérios para determinação do nível de serviço em rodovia de pista simples de classe I, II e III [TRB, 2010]	11
Tabela 2.2: Coeficientes usados na estimativa da <i>PTSF</i> em segmentos unidirecionais	12
Tabela 2.3: Valor que deve ser adicionado à <i>KU</i> devido à presença de zonas com ultrapassagens proibidas [FGSV, 2005]	19
Tabela 2.4: Critério para definir o nível de serviço com base na densidade [FGSV, 2005]	19
Tabela 2.5: Capacidade bidirecional para rodovias de pista simples [FGSV, 2005]	21
Tabela 2.6: Nível de serviço em função da densidade de veículos em pelotões [Van As, 2003].....	25
Tabela 2.7: Nível de serviço com base na densidade de veículos em pelotões, em função da classe da rodovia [ODOT, 2014].....	27
Tabela 2.8: Nível de serviço em função do atraso percentual [Washburn e Li, 2012].....	33
Tabela 2.9: Nível de serviço em função da liberdade do fluxo (η) [Polus e Cohen, 2009].....	35
Tabela 3.1: Rodovias de pista simples selecionadas para filmagem do tráfego.....	46
Tabela 3.2: Dados de tráfego dos 16 segmentos filmados	47
Tabela 3.3: Resumo dos dados obtidos de sensores	53
Tabela 3.4: Amostra de caminhões obtida para calibrar o modelo de desempenho do CORSIM.....	56
Tabela 4.1: Exemplos de funções <i>fitness</i> encontradas na literatura [Hollander e Liu, 2008] ...	67
Tabela 4.2: Intervalo de busca e valores <i>default</i> dos parâmetros de calibração do CORSIM...	70
Tabela 4.3: Valores calibrados e <i>default</i> para os submodelos do CORSIM	73
Tabela 4.4: Espaço de busca para os parâmetros do modelo de desempenho do CORSIM	76
Tabela 4.5: Valores calibrados e <i>default</i> para os parâmetros do modelo de desempenho	77
Tabela 5.1: Funções <i>fitness</i> encontradas para as estimativas da <i>PTSF</i>	92
Tabela 6.1: Características do projeto geométrico dos trechos homogêneos usados para gerar dados sintéticos	100

Tabela 6.2: Classificação dos trechos homogêneos em função das características do projeto geométrico	102
Tabela 6.3: Características do projeto geométrico dos trechos onde houve filmagem para coleta de dados.....	102
Tabela 6.4: Classificação dos trechos observados com filmadoras em função da geometria ..	103
Tabela 6.5: Parâmetros do modelo linear da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 70$ km/h .	105
Tabela 6.6: Parâmetros do modelo côncavo da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 70$ km/h	105
Tabela 6.7: Funções <i>fitness</i> encontradas para as medidas de desempenho fornecidas pelas relações fluxo-velocidade	109
Tabela 6.8: Funções <i>fitness</i> obtidas para as medidas de desempenho alternativas à <i>PTSF</i>	114
Tabela 6.9: Critérios para determinação do nível de serviço com base nas medidas de desempenho propostas.....	117
Tabela 6.10: Porcentagens de cada nível de serviço obtidas de acordo com o critério	117

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	4
1.2. Estrutura da tese.....	5
 2. Revisão da literatura	7
2.1. <i>Highway Capacity Manual</i> 2010	7
2.1.1. <i>Conceitos e condições básicas</i>	8
2.1.2. <i>Segmentos direcionais</i>	13
2.2. HBS2001: Manual de Capacidade Viária Alemão	17
2.3. Medidas de desempenho.....	22
2.3.1. <i>Velocidade média de viagem</i>	22
2.3.2. <i>Densidade</i>	24
2.3.3 <i>Pelotões</i>	28
2.3.4 <i>Ultrapassagens</i>	31
2.3.5 <i>Outras medidas de desempenho</i>	32
2.3.6 <i>Considerações finais</i>	35
 3. Coleta e tratamentos dos dados	39
3.1. Dados de tráfego obtidos com filmadoras	39
3.2. Dados de tráfego de laços indutivos	52
3.3. Dados obtidos com GPS	56
 4. Calibração e validação do CORSIM.....	61
4.1. Calibração de simuladores de tráfego com algoritmos genéticos.....	62
4.2. AG usado na calibração do CORSIM.....	64
4.3. Calibração dos modelos comportamentais do CORSIM.....	66

4.3.1. Função fitness.....	67
4.3.2. Parâmetros de calibração.....	69
4.3.2. Resultados da calibração e da validação.....	73
4.4. Calibração do modelo de desempenho do CORSIM	74
4.4.1. Função fitness.....	75
4.4.2. Parâmetros de calibração.....	75
4.4.2. Resultados da calibração e da validação.....	76
4.5. Considerações finais	77
5. Estimativas da PTSF a partir de dados de campo	79
5.1. Revisão da literatura.....	80
5.1.1. Estimativa da PTSF a partir da análise de ondas de choque	80
5.1.2. Estimativa da PTSF através da teoria dos gargalos móveis.....	83
5.1.3. Estimativa da PTSF baseada na teoria das filas	86
5.2. Calibração e validação do CORSIM.....	88
5.3. Análise da qualidade das estimativas da PTSF	89
6. Avaliação de medidas de desempenho	95
6.1. Visão geral do método de avaliação	95
6.2. Produção de dados de tráfego sintéticos	96
6.3. Geometria das vias	99
6.4. Modelos de tráfego.....	103
6.4.1. Relações fluxo-velocidade.....	104
6.4.2. Medidas de desempenho alternativas.....	109
6.5. Critérios para obtenção do Nível de Serviço	115

7. Conclusões e recomendações	119
7.1. Coleta de dados.....	119
7.2. Calibração e validação do CORSIM	120
7.3. Medidas de desempenho.....	121
7.4. Critérios de obtenção do nível de serviço.....	122
 8. Referências	 123
 Apêndices.....	 129
Apêndice A: Parâmetros dos modelos de tráfego.....	129
<i>A.1. Relações fluxo-velocidade (modelo linear)</i>	<i>131</i>
<i>A.2. Relações fluxo-velocidade (modelo côncavo)</i>	<i>129</i>
<i>A.3. Relações entre o fluxo e a densidade de veículos em pelotões.....</i>	<i>133</i>
<i>A.4. Relações entre o fluxo e a porcentagem de veículos em pelotões.....</i>	<i>136</i>
<i>A.5. Relações entre o fluxo e a porcentagem de veículos retidos.....</i>	<i>139</i>
<i>A.6. Relações entre o fluxo e o número médio de veículos em pelotões.....</i>	<i>142</i>
<i>A.7. Relações entre o fluxo e número médio de veículos fora dos pelotões</i>	<i>145</i>

1. Introdução

O transporte rodoviário tem um papel fundamental em todos os aspectos da sociedade brasileira, unindo mercados e integrando regiões e estados. Isso pode ser comprovado verificando-se a composição da matriz de transportes do Brasil: apesar do crescimento das demais modalidades ao longo das últimas décadas, cerca de 95% dos passageiros e 60% das cargas são transportados pelo modo rodoviário [CNT, 2012].

Assim como ocorre com grande parte dos países no mundo [Brilon e Weiser, 2006; Luttinen, 2006; Polus e Cohen, 2009], a malha rodoviária federal pavimentada brasileira é constituída, principalmente, por rodovias de pista simples, sendo que, no caso brasileiro, essa proporção chega quase a 90%. Isso mostra a importância desse tipo de estrada para o país, uma vez que elas têm servido, na maior parte dos casos, como elementos que proporcionam acessibilidade para regiões distantes de grandes centros urbanos, assim como também são importantes para algumas áreas populosas. Em muitos estados brasileiros, como Amazonas, Pará, Piauí e Mato Grosso do Sul, há, praticamente, somente rodovias de pista simples, constituindo mais de 97% das suas malhas rodoviárias [CNT, 2012].

A limitação dos recursos disponíveis para expansão da rede rodoviária e a necessidade de utilizá-la da forma mais eficiente possível requer estimativas da qualidade do serviço e da capacidade dos seus componentes individuais. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) usa o *Highway Capacity Manual* (HCM) para analisar as condições operacionais em rodovias e determinar a necessidade de realização de obras de melhoramento [DNIT, 2006]. O HCM também vem sendo utilizado por outras agências públicas, como a ARTESP (Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo), no estado de São Paulo [ARTESP, 2002].

Apesar de ser bastante usado no mundo inteiro, o HCM é, muitas vezes, aplicado sem que nenhuma adaptação às condições locais seja realizada, apesar do próprio manual advertir que isso deva ser feito [TRB, 2010, v. 1, p. 1-2]:

“o usuário deve sempre ter em mente que a maior parte da pesquisa básica, dos valores *default* e das aplicações típicas dizem respeito à América do Norte e, particularmente, aos EUA. Embora haja indubitável valor nos

métodos apresentados, sua aplicação fora da América do Norte requer uma ênfase adicional na adaptação de equações e processos para condições locais”.

Essa necessidade provém de diversos fatores que são diferentes em relação aos observados em rodovias americanas e canadenses, onde os dados foram obtidos para o desenvolvimento dos métodos apresentados no manual. Dentre essas condições distintas, destaca-se a forma de condução dos motoristas, as características dos veículos (tamanho, potência, massa) e a composição veicular [DNIT, 2006].

A importância de uma adaptação do HCM foi enfatizada pelo Tribunal de Contas da União (TCU) à época da concessão da BR-116 e da BR-324, quando recomendou à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) que fossem realizados ajustes nos fatores para que refletissem a realidade brasileira [TCU, 2008]. Mesmo que algumas adaptações tenham sido realizadas, a maior parte delas não tem um embasamento técnico-científico desejável, o que leva a obtenção de resultados que podem tanto subestimar ou superestimar a qualidade de serviço percebida pelos usuários da via [Setti, 2009]. Dessa forma, pode-se constatar a necessidade de criar uma versão brasileira do HCM – um “Manual de Capacidade Viária”, desenvolvido a partir de estudos realizados em rodovias do país.

Deve-se ressaltar que essa necessidade não é exclusiva do Brasil, visto que o HCM já foi adaptado para diversos países a fim de melhor refletir as particularidades locais. As adaptações podem incluir até mesmo uma completa modificação do processo de estimativa, como é o caso dos métodos para estimar nível de serviço de rodovias de pista simples usados na Alemanha [FGSV, 2005] e na África do Sul [Van As, 2003].

O desenvolvimento de uma versão local do Manual de Capacidade Viária deve considerar pelo menos três aspectos essenciais: (i) a definição de segmento com condições básicas e a sua capacidade; (ii) as medidas de desempenho que melhor refletem a relação entre a qualidade de serviço e as condições operacionais para segmentos de rodovias com condições básicas e não básicas; e (iii) o efeito dos veículos pesados sobre a capacidade e a qualidade de serviço [Setti, 2009].

Um assunto que vem sendo bastante estudado é a adaptação do método proposto pelo HCM para a análise de rodovias de pista simples. Com relação à versão do manual publicado em 2000, que é basicamente o mesmo da última versão do HCM [TRB, 2010], foram realiza-

das adaptações por Egami [2006] e por Mon-Ma [2008] a partir da premissa de que a estrutura do HCM deveria ser modificada apenas no que fosse estritamente necessário.

Consequentemente, os experimentos realizados para elaborar o Capítulo 20 do HCM2000 [Harwood *et al.*, 1999] foram replicados usando-se simuladores recalibrados para representar uma rodovia típica paulista. Foram mantidas as formas gerais das relações fundamentais, bem como as medidas de desempenho usadas para determinar o nível de serviço. Os dados coletados para a calibração e a validação dos simuladores utilizados eram limitados por uma faixa de fluxo bem abaixo da capacidade das rodovias selecionadas, uma vez que, na época, praticamente inexistiam estações permanentes de coleta de dados de tráfego em rodovias de pista simples. As adaptações propostas mostraram-se capazes de estimar a qualidade de serviço com uma precisão muito superior à obtida com o uso do HCM2000 [Utamura *et al.*, 2007].

Os problemas encontrados na adaptação do HCM2000 para rodovias de pista simples do estado de São Paulo levaram Egami [2006] e Mon-Ma [2008] a ressaltar que, além da necessidade de se obter conjuntos de dados mais representativos de toda a gama de condições operacionais, seria necessário realizar estudos mais detalhados sobre: (i) as relações fundamentais do tráfego; (ii) os diversos fatores de ajuste; e, (iii) as medidas de desempenho mais adequadas para refletir a qualidade de serviço em rodovias no Brasil. A importância da continuidade dessa linha de pesquisa foi também ressaltada, bem como a necessidade de acompanhar as alterações nas características do fluxo de tráfego.

Com base nessas recomendações, Bessa Jr. [2009] ampliou o conjunto de dados usados nesses estudos anteriores, observando segmentos com fluxos consideravelmente mais altos e incorporando dados de tráfego coletados por sensores permanentes instalados pelo DER-SP. Os resultados desse estudo sugerem que outros modelos das relações fundamentais de tráfego representariam melhor as condições operacionais das rodovias paulistas do que modelos com estrutura similar à dos usados no HCM2000.

Alguns autores [Van As, 2003; Polus e Cohen, 2009; Yu e Washburn, 2009] discutem a dificuldade em obter medidas de desempenho do fluxo de tráfego a partir de dados coletados em campo. Entre as recomendações da literatura, destaca-se a necessidade de propor medidas de desempenho que possam ser determinadas através da observação de parâmetros da corrente de tráfego (fluxo, *headways*, velocidades, etc.). Em particular, a porcentagem de tempo viajando

em pelotões (*PTSF*), como definida no HCM2000, é um parâmetro impossível de ser coletado diretamente do tráfego.

Em função disso, Bessa Jr. [2009] também estudou a possibilidade de determinar a qualidade do serviço usando medidas de desempenho obtidas diretamente da observação da corrente de tráfego. Diversas variáveis sugeridas na literatura foram testadas e os resultados obtidos sugerem que a estimativa da *PTSF* em função do número médio de *headways* dentro e fora dos pelotões [Polus e Cohen, 2009] reflete melhor a qualidade de serviço que a *PSTF* obtida através da medida *proxy* porcentagem de veículos em pelotões, como recomenda o HCM2000. Entretanto, o simulador usado (TWOPAS) não fornece, entre seus dados de saída, o número médio de *headways* dentro e fora dos pelotões, o que impediu de calcular essa medida de desempenho em condições de tráfego não observadas *in loco*.

Ainda que esses três estudos [Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr., 2009] tenham produzido avanços consideráveis na adaptação do HCM para rodovias no Brasil, os resultados obtidos mostram que essa base de conhecimentos ainda necessitava ser expandida para fornecer subsídios suficientes para o desenvolvimento de um Manual de Capacidade Viária com um método para avaliar rodovias de pista simples brasileiras.

1.1. Objetivos

Este trabalho teve como meta principal propor medidas de desempenho que pudessem ser adequadas para descrever a qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil. Foram traçados os seguintes objetivos específicos para atingir a meta da pesquisa:

1. Obter um conjunto de dados de tráfego com características diversas, tanto quanto possível, seja do ponto de vista do fluxo de tráfego, seja relacionado com a geometria viária;
2. Escolher, calibrar e validar um simulador de tráfego, a fim de representar diversas situações de maneira controlada;
3. Analisar e determinar medidas de desempenho adequadas para avaliar a qualidade de serviço em rodovias brasileiras; devem ser desenvolvidos modelos de tráfego que relacionem o fluxo e as medidas de desempenho para estimar o nível de serviço, além de avaliar a qualidade desses modelos ao compará-los com dados de campo; e

4. Obter critérios para determinar o nível de serviço com base nas medidas de desempenho recomendadas.

1.2. Estrutura da tese

Esta tese foi organizada em sete capítulos, incluindo esta introdução com a justificativa da pesquisa e os objetivos traçados. O Capítulo 2 trata da revisão da literatura disponível acerca de manuais de capacidade viária e sobre medidas de desempenho de rodovias de pista simples. O Capítulo 3 aborda a coleta e o tratamento dos dados de tráfego, obtidos por meio de filmagens, de sensores de tráfego e acerca do desempenho de veículos pesados em aclives. Os resultados da calibração e da validação do simulador escolhido, o CORSIM, são apresentados no Capítulo 4, realizadas para ajustar os parâmetros comportamentais e o modelo de desempenho do CORSIM.

O Capítulo 5 mostra uma análise de modelos propostos em algumas pesquisas para estimar a porcentagem de tempo viajando em pelotões (*PTSF*). A avaliação de outras medidas de desempenho encontradas durante a revisão da literatura é apresentada no Capítulo 6. Nessa parte da tese, são mostrados os modelos de tráfego desenvolvidos que relacionam o fluxo de tráfego direcional e as medidas de desempenho produzidas por simulação, em função da geometria viária, da porcentagem de veículos pesados e da velocidade de fluxo livre. Medidas de desempenho coletadas em campo foram comparadas com aqueles provenientes desses modelos de tráfego. Ainda no Capítulo 6, são apresentados os critérios obtidos para determinar o nível de serviço com base nas medidas de desempenho propostas. O Capítulo 7 apresenta as conclusões e as recomendações desta pesquisa.

2. Revisão da literatura

Esta revisão da literatura foi organizada de modo que, primeiramente, fossem relatadas algumas das características dos dois manuais de capacidade viária que serviram de referência para este trabalho: (i) o *Highway Capacity Manual*; manual americano cuja última edição foi lançada em 2010; e (ii) o HBS2001, manual alemão que teve sua última revisão lançada em 2005.

Em seguida, é apresentada uma síntese sobre trabalhos relacionados com medidas de desempenho voltadas para rodovias de pista simples. Uma avaliação dessas medidas de desempenho permitiu a escolha das principais a serem estudadas nos capítulos seguintes. Outros temas importantes, tais como sobre simuladores de tráfego em rodovias de pista simples; sobre calibração e validação de simuladores com base em algoritmos genéticos; e sobre modelos para estimar a Porcentagem de Tempo Viajando em Pelotões (*PTSF*) – medida de desempenho proposta pelo HCM2010 – a partir de dados de campo são tratados em capítulos específicos, a fim de facilitar a apresentação dos resultados.

2.1. *Highway Capacity Manual 2010*

O *Highway Capacity Manual 2010* [TRB, 2010] é a quinta edição do manual que é a principal referência no mundo para análise da capacidade e do nível de serviço de diversos componentes viários, como as rodovias de pista simples. Em relação à versão anterior, publicada em 2000 [TRB, 2000], o HCM2010 acrescentou mais conteúdo, especialmente devido às revisões a que o manual foi submetido para que fosse melhor entendido e aplicado pelos usuários. Os experimentos realizados para desenvolver os métodos para avaliar rodovias de pista simples são os mesmos do HCM2000, desenvolvidos como parte do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) Project 3-55(3) [Harwood *et al.*, 1999] e revisados como parte do NCHRP Project 20-7(160) [Harwood *et al.*, 2003].

As principais alterações no método do HCM2010 para avaliar rodovias de pista simples, em relação ao método do HCM2000, foram: (i) a extinção da análise bidirecional; para isso, é necessário usar a análise unidirecional e combinar as medidas de desempenho para avaliar segmentos de rodovias em ambas as direções; (ii) a reorganização de alguns modelos e tabe-

las; (iii) o acréscimo de uma terceira classe de rodovias, voltadas para regiões urbanizadas; e (iv) o acréscimo do método para determinar o nível de serviço em faixas voltadas para ciclistas. Os itens (i) e (ii), por serem mais relacionados com a meta deste trabalho, são abordados nas seções a seguir.

2.1.1. Conceitos e condições básicas

O primeiro conceito trazido pelo HCM2010 diz respeito à diferenciação entre *volume* e *fluxo de tráfego*. Segundo o manual, volume significa “o número total de veículos que passam por um dado ponto ou seção de uma faixa ou rodovia durante um intervalo de tempo conhecido; qualquer intervalo de tempo pode ser usado, mas volumes são usualmente expressados em termos anuais, diários, horários ou em períodos menores do que 1 hora”; fluxo de tráfego, por sua vez, significa “o volume horário equivalente na qual passam veículos por um dado ponto ou seção de uma faixa ou rodovia durante um conhecido intervalo de tempo menor do que 1 hora, usualmente 15 minutos” [TRB, 2010, v.1, p. 4-2].

Outro conceito importante presente no HCM2010 trata da *capacidade*, que pode ser de pedestres ou de veículos. No caso da *capacidade veicular*, significa “o número máximo de veículos que pode passar por um ponto em um período de tempo conhecido, segundo determinadas condições geométricas, de tráfego e de controle da rodovia” [TRB, 2010, v.1, p. 4-17].

No HCM2010, também existe uma diferenciação entre *qualidade de serviço* e *nível de serviço*. A qualidade de serviço significa, do ponto de vista do usuário, o grau de satisfação da operação de um componente de transportes. Essa qualidade pode ser percebida pelo usuário de diferentes maneiras, por medidas de desempenho quantitativas ou qualitativas, como o tempo de viagem, o atraso, o grau de liberdade para realização de manobras (ultrapassagens, por exemplo), o conforto e a segurança. O nível de serviço, por outro lado, é uma estratificação quantitativa de uma ou mais medidas de desempenho que representam a qualidade de serviço. Essas medidas de desempenho são chamadas de *medidas de serviço* [TRB, 2010, v.1, p.5-2,3].

No caso de rodovias de pista simples, as medidas de serviço – ou medidas de desempenho da qualidade de serviço – diferem das adotadas na análise de *freeways* e de rodovias de pista dupla, que usam a densidade. Em rodovias de pista simples, ultrapassagens e mudanças de faixa somente são possíveis quando existe visibilidade suficiente no sentido oposto para reali-

zação das manobras. Quando não é possível, a mobilidade é comprometida, gerando desconforto para motoristas que permanecem atrás de um veículo mais lento.

Esse tipo de rodovia compõe a maior parte da malha viária dos países, servindo como um componente que promove, principalmente, a mobilidade. Em alguns casos, a acessibilidade é a meta, não sendo importante desenvolver altas velocidades. Por essas razões, o HCM adota três medidas de desempenho para análise de rodovias de pista simples, dependendo da classe do segmento a ser estudada: a porcentagem de tempo viajando em pelotões (*PTSF*), a velocidade média de viagem (*ATS*) e a porcentagem da velocidade de fluxo livre (*PFFS*).

A *PTSF* representa a liberdade para realização de manobras e o conforto durante a viagem. É definida como a porcentagem do tempo que os veículos viajam em pelotões atrás de veículos lentos devido à impossibilidade de ultrapassá-los. Dessa definição, é possível perceber que obter *PTSF* em campo é quase impossível, pois, para isso, deveria existir um pesquisador em cada automóvel presente na rodovia. Sendo assim, o HCM recomenda o uso da porcentagem de veículos em pelotões (*PF*) como uma medida *proxy* da *PTSF*. Segundo o manual, a *PF*, que é obtida como a porcentagem de *headways* com valores menores do que 3 segundos, deve ser obtida em um ponto representativo na estrada. No entanto, pelo menos um trabalho [Dixon *et al.*, 2002] mostrou que *PF* e *PTSF* podem diferir bastante.

O HCM2010 define três classes de rodovias de pista simples, em função da sua utilização:

- Classe I: são rodovias em que os motoristas esperam viajar com velocidades altas; representa a maior parte das rodovias de pista simples, servem para ligar rodovias com fluxos elevados; podem servir para viagens de longa duração;
- Classe II: motoristas não necessariamente desejam viajar com velocidades elevadas; geralmente são vias em zonas turísticas, bastante frequentadas por veículos recreacionais (por ex., *motorhomes* e carros com *trailers*); ou são rodovias em zonas de relevo montanhoso, onde velocidades altas são impossíveis; e
- Classe III: são rodovias próximas a áreas urbanas; pode ser parte de uma rodovia de classe I ou de classe II, mas que passam por cidades ou regiões turísticas desenvolvidas; nesses casos, muitas vezes o tráfego local é combinado com tráfego de passagem, gerado por viagens de longa distância.

O método de análise de rodovias de pista simples está apresentado no Capítulo 15 do HCM2010. Nesse capítulo, os níveis de serviço são definidos em:

- Nível A: no caso de rodovias de classe I, os motoristas trafegam com altas velocidades e com liberdade para realização de ultrapassagens; pelotões possuem, no máximo, 3 ou 4 veículos. Para rodovias de classe II, a velocidade desenvolvida depende das condições das rodovias; pequenos pelotões também são esperados; em rodovias de classe III, motoristas trafegam com velocidades próximas da velocidade de fluxo livre (*FFS*);
- Nível B: capacidade de realizar manobras passam a depender mais do fluxo oposto, e os pelotões passam a ser mais notáveis; em rodovias de classe I, é esperado alguma redução de velocidade, enquanto que em segmentos de classe III, é difícil manter a velocidade próximo da *FFS*, embora essa redução seja pequena;
- Nível C: muitos veículos estão viajando em pelotões; em todas as classes, as velocidades são notadamente reduzidas;
- Nível D: pelotões crescem bastante e a demanda por ultrapassagens é bastante alta, embora as oportunidades sejam próximas de zero; em rodovias de classe I e II, a *PTSF* é bastante elevada; em rodovias de classe III, as velocidades são bem menores do que a *FFS*;
- Nível E: existe demanda por ultrapassagens por parte de todos os motoristas, com *PTSF* maior do que 80%. Velocidades são bastante reduzidas em rodovias de classe II, enquanto que, em segmentos de classe III, a velocidade média é menor do que dois terços da *FFS*; e
- Nível F: o fluxo de tráfego excede a capacidade em uma das duas direções; as condições de operação são instáveis, com regime de fluxo congestionado.

As medidas de desempenho usadas no HCM2010 para determinar o nível de serviço em rodovias de classe I são a *ATS* e a *PTSF*. A *PTSF* é utilizada, sozinha, em rodovias de classe II. Em rodovias de classe III, por conta dos segmentos serem, geralmente, curtos e com restrições de ultrapassagens, os motoristas esperam viajar o mais próximo possível do limite legal de velocidade. Para esse tipo de rodovia, deve-se usar a *PFFS*, medida de desempenho que não era usada no HCM2000. Os critérios para definição do nível de serviço em rodovias de

pista simples estão apresentados na Tabela 2.1. No caso da classe I, a *PTSF* e a *ATS* devem ser atendidas simultaneamente, de acordo com a Figura 2.1.

Tabela 2.1: Critérios para determinação do nível de serviço em rodovia de pista simples de classe I, II e III [TRB, 2010]

(a) Rodovias de classe I			(b) Rodovias de classe II		(c) Rodovias de classe III	
NS	<i>PTSF</i> (%)	<i>ATS</i> (km/h)	NS	<i>PTSF</i> (%)	NS	<i>PFFS</i> (%)
A	≤ 35	> 90	A	≤ 40	A	> 91,7
B	> 35-50	> 80-90	B	> 40-55	B	> 83,3-91,7
C	> 50-65	> 70-80	C	> 55-70	C	> 75,0-83,3
D	> 65-80	> 60-70	D	> 70-85	D	> 66,7-70,5
E	> 80	≤ 60	E	> 85	E	≤ 66,7

Figura 2.1: Critério para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples de classe I [TRB, 2000]

Esses critérios devem ser usados na análise direcional, para rampas específicas e com outras características, desde que fatores de ajustes sejam considerados. O nível de serviço “F” é aplicado quando o fluxo de tráfego excede a capacidade, de 1700 cp/h para uma direção do tráfego em condições básicas. Devido à grande interação entre os fluxos nas duas direções, quando a capacidade em uma direção é atingida, a capacidade na direção oposta é reduzida, sendo, dessa forma, a capacidade bidirecional igual a 3200 cp/h.

As condições básicas são padrões desejados que, quando não são atendidos, provocam um efeito negativo nas medidas de desempenho. Para rodovias de pista simples, as condições básicas são: (i) largura das faixas maiores ou iguais a 3,65 m (12 ft); (ii) acostamentos pavimentados com largura maior ou igual a 1,83 m (6 ft); (iii) 100% de zonas com ultrapassagens

permitidas; (iv) somente automóveis na corrente de tráfego; (v) relevo plano; e (vi) tráfego ininterrupto.

O HCM2010 fornece relações de tráfego para condições básicas (Equações 2.1 e 2.2). No caso da relação entre o fluxo e as medidas de desempenho direcionais, os modelos são obtidos em função do fluxo oposto. Para obter a *PTSF*, é necessário usar coeficientes para os modelos de acordo com o fluxo oposto, como mostra a Tabela 2.2.

$$ATS_d = FFS - 0,0125 \cdot (v_d + v_o) - f_{np,ATS}, \quad (2.1)$$

em que ATS_d : velocidade média para a direção analisada (km/h);

FFS : velocidade no fluxo livre (km/h);

$f_{np,ATS}$: fator de ajuste em razão da presença de zonas de ultrapassagens proibidas para estimar ATS_d (Tabela 15-15 do HCM2010);

v_d : fluxo de tráfego na direção analisada, dado em carros de passeio equivalente (cp/h); e

v_o : fluxo de tráfego na direção oposta (cp/h)

$$BPTSF_d = 100 \cdot \left(1 - e^{a \cdot v_d^b}\right), \quad (2.2)$$

em que $BPTSF_d$: porcentagem de tempo viajando em pelotões direcional em condições básicas; e

a, b : parâmetros de calibração, em função do fluxo oposto (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Coeficientes usados na estimativa da *PTSF* em segmentos unidirecionais

Fluxo na direção oposta (cp/h)	a	b
≤ 200	-0,0014	0,973
400	-0,0022	0,923
600	-0,0033	0,870
800	-0,0045	0,833
1000	-0,0049	0,829
1200	-0,0054	0,825
1400	-0,0058	0,821
≥ 1600	-0,0062	0,817

Quando são observadas condições não básicas nos segmentos analisados, devem ser aplicados fatores de ajustes nas Equações 2.1 e 2.2. Esse assunto é abordado a seguir, como parte

do método para HCM2010 para análise da capacidade e do nível de serviço de rodovias de pista simples da classe I, ilustrado pela Figura 2.2.

Figura 2.2: Método para estimativa do nível de serviço para rodovias de pista simples de classe I do HCM2010

2.1.2. Segmentos direcionais

No HCM2010, a análise de segmentos direcionais pode ser realizada para três diferentes tipos de segmentos: com relevo plano ou ondulado, com rampas específicas ascendentes ou com rampas específicas descendentes. O primeiro passo dessa análise consiste em estimar a velocidade de fluxo livre (FFS), que pode ser considerada como a velocidade média de uma corrente de tráfego cujo fluxo de tráfego bidirecional não seja superior a 200 veic/h. Para fluxos maiores, existem duas maneiras de determinar a velocidade de fluxo livre: ou por meio da observação

de correntes de tráfego em campo, como mostra a Equação 2.3, ou realizando uma estimativa por meio da Equação 2.4.

$$FFS = S_{FM} + 0,0125 \cdot \frac{v}{f_{HV}}, \quad (2.3)$$

em que S_{FM} : velocidade média do tráfego medido em campo (km/h);

v : fluxo de tráfego bidirecional observado (veic/h); e

f_{HV} : fator de ajuste para os veículos pesados.

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A, \quad (2.4)$$

em que $BFFS$: velocidade de fluxo livre básica, entre 70 e 110 km/h;

f_{LS} : fator de ajuste para a largura da faixa e do acostamento (Tabela 15-7 do HCM2010); e

f_A : fator de ajuste para a densidade de pontos de acessos (Tabela 15-8 do HCM2010).

Por definição, $BFFS$ é a velocidade que seria obtida em uma rodovia com alinhamentos vertical e horizontal específicos, se as larguras das faixas de rolagem e os acostamentos possuem valores padrões e não há pontos de acesso. Algumas vezes, os limites de velocidade impostos não representam às condições das vias e os desejos dos motoristas. O HCM2010 sugere duas maneiras de estimar a velocidade de fluxo livre básica ($BFFS$): (i) a velocidade de projeto; e (ii) a velocidade limite da rodovias mais 16 km/h (10 mi/h) [TRB, 2010, v.2, p. 15-15].

A determinação do fluxo de tráfego (v_p), na direção analisada e na direção oposta, deve ser medida em carros de passeio equivalente por hora (cp/h) para os 15 minutos críticos da hora observada, de acordo com a Equação 2.5. Essa formulação deve ser usada para determinar ATS_d e $PTSF_d$ separadamente, a partir de coeficientes de ajuste específicos (f_G e f_{HV}) para cada caso.

$$v_p = \frac{V}{PHF \cdot f_G \cdot f_{HV}}, \quad (2.5)$$

em que V : volume horário na direção analisada (veic/h);

PHF : fator de hora pico; e

f_G : fator de ajuste para rampas (Tabelas 15-9 e 15-16 do HCM2010 para estimar ATS_d e $PTSF_d$, respectivamente).

A Equação 2.5 mostra que v_p é função do fator de ajuste para veículos pesados (f_{HV}), calculado de acordo com a Equação 2.6. Para o caso de segmentos específicos em aclives, que são aqueles com rampas maiores do que 3% e com extensão maior do que 400 m, outros fatores de ajuste devem ser usados (Tabelas 15-10, 15-12, 15-17 e 15-19 do HCM2010).

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1)}, \quad (2.6)$$

em que P_T : proporção de caminhões e ônibus na corrente de tráfego;

P_R : proporção de veículos recreacionais na corrente de tráfego;

E_T : equivalente veicular para os caminhões e ônibus (Tabelas 15-11 e 15-18 do HCM2010 para estimar ATS_d e $PTSF_d$, respectivamente); e

E_R : equivalente veicular para os veículos recreacionais.

Para estimar a $PTSF_d$, deve-se usar a formulação:

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \left(\frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right), \quad (2.7)$$

em que $BPTSF_d$: $PTSF$ direcional em condições básicas (Equação 2.2);

$f_{np,PTSF}$: fator de ajuste para zonas com ultrapassagens proibidas para estimar $PTSF_d$ (Tabela 15-21 do HCM2010);

$v_{d,PTSF}$: fluxo de tráfego direcional para estimação da $PTSF_d$ (cp/h); e

$v_{o,PTSF}$: fluxo de tráfego na direção oposta para estimação da $PTSF_d$ (cp/h).

A última medida de desempenho a ser obtida, para análise de rodovias de pista simples de classe III, é a $PFFS$, definida como a razão entre ATS_d e FFS . O nível de serviço deve ser determinado de acordo com os critérios da Tabela 2.1.

A análise de segmentos com faixas adicionais (de ultrapassagens ou de subida) consiste em dividir um segmento a ser analisado (de comprimento L_i) em regiões específicas. Sendo assim, algumas variáveis devem ser definidas:

- L_u , comprimento do segmento antes da faixa de ultrapassagem, em km;

- L_d , comprimento do segmento após os efeitos da faixa de ultrapassagem terem cessado, em km;
- L_{pl} , comprimento da faixa de ultrapassagem (km); e
- L_{de} , comprimento do segmento após o término da faixa de ultrapassagem, onde ainda existe um efeito da faixa de ultrapassagem nas medidas de desempenho (km).

Essas regiões surgem com a presença de faixas adicionais e provocam um impacto nas medidas de desempenho *ATS* e *PTSF*, como ilustra as Figuras 2.3 e 2.4.

Figura 2.3: Efeito da faixa adicional na velocidade média de viagem [Mon-Ma, 2008, adaptado do HCM2000]

Figura 2.4: Efeito da faixa adicional na porcentagem de tempo viajando em pelotões [Mon-Ma, 2008, adaptado do HCM2000]

Assim, para faixas de ultrapassagens, as medidas de desempenho devem ser calculadas da seguinte maneira:

$$ATS_{pl} = \frac{ATS_d \cdot L_t}{L_u + L_d + \frac{L_{pl}}{f_{pl}} + \frac{2 \cdot L_{de}}{1 + f_{pl}}}, \quad (2.8)$$

$$PTSF_{pl} = \frac{PTSF_d \cdot \left[L_u + L_d + f_{pl} \cdot L_{pl} + \left(\frac{1 + f_{pl}}{2} \right) \cdot L_{de} \right]}{L_t}, \quad (2.9)$$

em que ATS_{pl} : velocidade média de viagem no segmento com faixa de ultrapassagem (km/h);

$PTSF_{pl}$: porcentagem de tempo viajando em pelotões no segmento com faixa de ultrapassagem; e

f_{pl} : fator de ajuste para as faixas adicionais (Tabelas 15-26 e 15-28 do HCM2010 para faixas de ultrapassagens e Tabela 15-29 do HCM2010 para faixas adicionais em subidas).

Para segmentos com faixas adicionais em subidas, deve ser usado o mesmo procedimento orientado para faixas de ultrapassagens, exceto com relação ao fator de ajuste f_{pl} . Nesse caso, são diferentes em relação aos usados na análise de faixas de ultrapassagens.

Se o segmento observado é interrompido após o final da faixa adicional – devido a uma interseção ou uma cidade, por exemplo – então o segmento L_{de} é interrompido (passando a ser chamado de L_{de}' , menor que L_{de}) e o segmento L_d passa a não existir. Nesses casos, para estimar as medidas de desempenho, as seguintes formulações devem ser usadas:

$$ATS_{pl} = \frac{ATS_d \cdot L_t}{L_u + \frac{L_{pl}}{f_{pl}} + \frac{2 \cdot L_{de}'}{1 + f_{pl} + (f_{pl} - 1) \left(\frac{L_{de} - L_{de}'}{L_{de}} \right)}}, \quad (2.10)$$

$$PTSF_{pl} = \frac{PTSF_d \cdot \left[L_u + f_{pl} \cdot L_{pl} + f_{pl} \cdot L_{de}' + \left(\frac{1 - f_{pl}}{2} \right) \cdot \left(\frac{L_{de}'^2}{L_{de}} \right) \right]}{L_t}, \quad (2.11)$$

2.2. HBS2001: Manual de Capacidade Viária Alemão

Na Alemanha, foram realizados estudos com o objetivo de desenvolver um manual para determinar a qualidade da corrente de tráfego em componentes como rodovias, interseções, vias com prioridade para transportes públicos e vias orientadas para bicicletas e para pedestres. Esse esforço resultou no Manual de Capacidade Viária Alemão, conhecido como HBS, publicado em 2001. Desde então, foram lançadas somente atualizações, sendo a última em 2005. Dentre os métodos propostos, existe um orientado para rodovias de pista simples.

Tanto quanto possível, a estrutura do HCM2000 [TRB, 2000] serviu de base para a elaboração do HBS2001, especialmente pelo fato do manual americano ser o mais utilizado no mundo. As classes de níveis de serviço adotadas pelos manuais americano e alemão ilustram esse fato, pois são organizados de “A” (para o melhor caso) a “F” (para o pior caso) [FGSV, 2005].

O HBS2001 define o termo “capacidade” da mesma forma como o HCM2010, ou seja, representa o maior número de elementos de tráfego (veículos, por exemplo) que pode passar numa seção de controle por unidade de tempo. Para rodovias, a capacidade é dada em veic/h, que pode variar dependendo da finalidade da viagem e do grau de conhecimento que o motorista tem da região [FGSV, 2005].

Para análise de rodovias de pista simples, a medida de desempenho usada no HBS2001 é a densidade para automóveis, calculada pela razão entre o fluxo de tráfego bidirecional (soma dos fluxos de tráfego unidirecionais) e a velocidade média de viagem dos automóveis (velocidade média no espaço). Por dessa definição, o manual fornece curvas fluxo-velocidade.

A porcentagem de veículos em pelotões (*PTSF*) não foi usada como uma medida de desempenho. O manual considera que ela expressa mais uma inconveniência do motorista do que, efetivamente, a eficiência operacional da rodovia. Por essa razão, a *PTSF* não seria importante no planejamento de transportes na Alemanha [Brilon e Weiser, 2006].

Uma diferença importante do HBS2001 em relação ao HCM2010 é a forma da relação entre o fluxo e a velocidade média de viagem para rodovias de pista simples. No HBS2001, a curva possui um formato côncavo, mais adequado para os dados observados nas estradas alemãs, enquanto que no HCM2010 a relação adotada tem um formato linear [Brilon e Weiser, 1998; Brilon e Weiser, 2006].

Para estimação do nível de serviço, o efeito da declividade e do comprimento de rampas é representado conjuntamente por uma variável chamada “classe da rampa” (*COG*), definida por meio do impacto provocado na velocidade de um “veículo pesado de projeto” nessas rampas. Para esse veículo, que deve possuir uma relação massa/potência igual ao 85º percentil de uma distribuição de relações massa/potência de uma amostra de caminhões, determina-se a velocidade de equilíbrio alcançada (*BSFZ*) em um segmento de rodovia.

Caso a velocidade de equilíbrio não seja alcançada, determina-se *BSFZ* a partir da média aritmética entre a velocidade inicial (80 km/h) e a velocidade mínima alcançada. Com isso, o valor de *COG* em cada sentido de tráfego é obtido da seguinte forma: *BSFZ* > 70 km/h (*COG* = 1); 55 < *BSFZ* ≤ 70 km/h (*COG* = 2); 40 < *BSFZ* ≤ 55 km/h (*COG* = 3); 30 < *BSFZ* ≤ 40 km/h (*COG* = 4); e *BSFZ* < 30 km/h (*COG* = 5).

O alinhamento horizontal é tratado para um segmento homogêneo de uma rodovia com extensão *L*, dado em km, com *n* elementos geométricos (tangente, curva circular, curva de transição). A Equação 2.12 mostra como a sinuosidade *KU*, dada em graus/km, deve ser calculada:

$$KU = \frac{\sum_{i=1}^n |\gamma_i|}{L}, \quad (2.12)$$

em que γ_i : mudança angular do elemento horizontal *i* (graus).

As zonas com ultrapassagens proibidas (*A_{UVB}*), dada em porcentagem, implicam na adição de um valor à variável *KU*, como mostra a Tabela 2.3. Com relação à sinuosidade, são usadas quatro classes aos valores de *KU*: *KU* ≤ 67; 67 < *KU* ≤ 135, entre 135 < *KU* ≤ 202 e *KU* > 202, dados em graus/km. O critério para definir os seis níveis de serviço (de A a F), com base na densidade (*D_{car}*) calculada pela relação entre o fluxo de tráfego total e a velocidade média de viagem dos automóveis, está mostrado na Tabela 2.4 [FGSV, 2005].

Tabela 2.3: Valor que deve ser adicionado à *KU* devido à presença de zonas com ultrapassagens proibidas [FGSV, 2005]

<i>A_{UVB}</i> (%)	Valor adicionado à <i>KU</i> (graus/km)
0 - 30	4,5 x <i>A_{UVB}</i>
30 - 100	135 + 1,3 x (<i>A_{UVB}</i> - 30)

Tabela 2.4: Critério para definir o nível de serviço com base na densidade [FGSV, 2005]

Nível de serviço	Densidade <i>D_{car}</i> (veic/km)
A	<i>D_{car}</i> ≤ 5
B	5 < <i>D_{car}</i> ≤ 12
C	12 < <i>D_{car}</i> ≤ 20
D	20 < <i>D_{car}</i> ≤ 30
E	30 < <i>D_{car}</i> ≤ 40
F	<i>D_{car}</i> > 40

A Figura 2.5 mostra diagramas fluxo-velocidade bidirecionais para locais onde o relevo é plano e possui sinuosidade menor ou igual a 67 graus/km. As curvas apresentadas referem-se a segmentos onde a porcentagem de veículos pesados (P_{HV}) varia de 0% a 20%, em passos de 10% (a influência no aumento da porcentagem de veículos pesados foi insignificante em passos de 5% para o segmento com essa geometria).

Figura 2.5: Critério para determinação do nível de serviço em segmentos onde o relevo é plano, com sinuosidade menor ou igual a 67 graus/km e com P_{HV} variando entre 0% (curva de cima) e 20% (curva de baixo) [FGSV, 2005]

O HBS apresenta valores para a capacidade bidirecional, que não deveria ser maior do que 2500 veic/h ($COG = 1$; $KU \leq 67$ graus/km e $P_{hv} = 0\%$). A Tabela 2.5 mostra a relação entre a capacidade, a geometria viária e a porcentagem de veículos pesados. A menor capacidade unidirecional foi de 950 veic/h ($COG = 5$; $KU > 202$ graus/km e $P_{hv} = 25\%$) [FGSV, 2005].

A análise bidirecional é recomendada pelo HBS2001. A justificativa é que, geralmente, a divisão direcional observada nas estradas alemãs é de 50%/50%. Os dados empíricos obtidos para a elaboração do manual mostraram que em apenas 7% dos casos a divisão direcional foi maior do que 70%/30%, ocorrendo principalmente em volumes baixos, casos que são casos irrelevantes em projeto de rodovias [Brilon e Weiser, 2006].

Tabela 2.5: Capacidade bidirecional para rodovias de pista simples [FGSV, 2005]

COG	KU (graus/km)	Capacidade bidirecional (veic/h)					
		Porcentagem de veículos pesados (%)					
		0	5	10	15	20	25
1	0 - 67	2500	2490	2370	2290	2255	2215
	67 - 135	2075	2075	2065	2060	2060	2060
	135 - 202	1935	1875	1840	1815	1800	1780
	> 202	1855	1805	1770	1745	1740	1720
2	0 - 67	2500	2420	2295	2195	2125	2100
	67 - 135	2070	2070	2065	2060	2050	2045
	135 - 202	1930	1870	1830	1810	1795	1780
	> 202	1855	1795	1760	1735	1715	1700
3	0 - 67	2500	2115	1965	1865	1795	1750
	67 - 135	2000	1975	1925	1865	1795	1750
	135 - 202	1930	1840	1795	1755	1735	1720
	> 202	1855	1780	1740	1705	1680	1675
4	0 - 67	2400	1735	1590	1510	1445	1405
	67 - 135	2000	1680	1580	1510	1445	1405
	135 - 202	1930	1665	1570	1510	1445	1405
	> 202	1855	1650	1570	1510	1445	1405
5	0 - 67	2000	1400	1230	1140	1055	950
	67 - 135	1800	1385	1230	1140	1045	950
	135 - 202	1800	1370	1230	1140	1045	950
	> 202	1795	1360	1230	1140	1040	940

O HBS2001 também permite a avaliação de vários segmentos homogêneos ao mesmo tempo. Para isso, deve ser calculada a densidade D_i para cada subsegmento i e combiná-los em uma única medida de desempenho D , conforme mostra a Equação 2.13. Por fim, o nível de serviço deve ser determinado com base na Tabela 2.4 [FGSV, 2005].

$$D_{car} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i \cdot L_i}{L}, \quad (2.13)$$

em que D_i : densidade dos automóveis para um segmento homogêneo i (veic/km);

D_{car} : densidade dos automóveis para o segmento avaliado (veic/km);

L_i : comprimento de um segmento homogêneo i (km); e

L : comprimento total do segmento avaliado (km).

O HBS2001 considera segmentos homogêneos aqueles: (i) com declividade absoluta menor do que 3%; (ii) com comprimentos maiores do que 300 m, declividade absoluta maior do que 3% e uma diferença menor do que 2% em relação à declividade do segmento seguinte; e (iii) com comprimentos menores do que 300 m, declividade absoluta maior do que 3% e dife-

rença maior do que 2% em relação à declividade do segmento seguinte. O manual não apresenta um método para tratar das faixas adicionais.

2.3. Medidas de desempenho

A meta desta seção foi apresentar uma síntese da literatura acerca das medidas de desempenho da qualidade de serviço em rodovias de pista simples. As medidas de desempenho podem ser organizadas em categorias, como, por exemplo, aquelas que são ou relacionadas com o desconforto do motorista ou com a operação da via; ou mesmo aquelas que podem ser obtidas em um ponto da estrada ou em um segmento de rodovia. Dentre essas medidas, estão: (i) o comprimento médio do pelotão [Pursula e Enberg, 1991; Polus e Cohen, 2009]; (ii) a porcentagem de veículos em pelotão [Botma, 1986; Pursula e Enberg, 1991; Romana, 1994]; (iii) a velocidade média de viagem [Arazoza e McLeod, 1993; TRB, 2010]; (iv) a densidade de veículos em pelotões [Van As, 2003]; a (v) densidade dos automóveis [FGSV, 2005]; (vi) o atraso percentual [Yu e Washburn, 2009]; (vii) a porcentagem de tempo viajando em pelotões [TRB, 2010]; e a porcentagem de veículos retidos [Al-Kaisy e Durbin, 2007].

Foram excluídas da análise as propostas de estimação da *PTSF* com base em dados coletados em campo. A avaliação dessas propostas e a aplicação para estimar a *PTSF* podem ser vistas no Capítulo 5.

2.3.1. Velocidade média de viagem

A velocidade média de viagem é, historicamente, a principal medida de desempenho de rodovias de pista simples [Romana, 1994]. É uma variável relativamente fácil de ser obtida em campo e é utilizada em manuais de tráfego importantes para determinar o nível de serviço, como o HCM2010 (junto com a *PTSF*) e o HBS2001 (no cálculo da densidade para automóveis). Os trabalhos relacionados com a velocidade dos veículos têm se concentrado, principalmente, no fornecimento de modelos fluxo-velocidade para veículos de passeio (condições básicas), curva que vem sendo usada desde a primeira versão do HCM, publicada em 1950.

Em várias pesquisas [Luttinen, 2000; Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr., 2009; Maldonado *et al.*, 2011], os modelos fluxo-velocidade do HCM foram adaptados às condições locais e esse esforço apresentou bons resultados quanto à estimativa do nível de serviço. O formato da curva é um ponto importante, sobre o qual ainda não se alcançou um consenso.

Pode ter o formato linear [Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; TRB, 2010] ou não linear [FGSV, 2005; Luttinen, 2000; Romana e Núñez, 2011; Bessa Jr. e Setti, 2011a; Moreno *et al.*, 2014].

Luttinen [2000], por exemplo, estudou relações fluxo-velocidade para rodovias de pistas simples na Finlândia. Neste trabalho, foram comparados um modelo linear e um côncavo. O modelo côncavo foi baseado no proposto pelo manual alemão HBS, ilustrada pela Equação 2.14, com diferenças para o termo que inclui q_o , usado para avaliar o efeito do fluxo oposto na velocidade média. Tanto no caso alemão, quanto para os testes feitos na Finlândia (Equação 2.15), os resultados mostraram que o modelo côncavo representa melhor as condições de tráfego locais.

$$ATS_d = FFS_d + b_1 \cdot \sqrt{q_d} + b_2 \cdot \sqrt{q_o}, \quad (2.14)$$

$$ATS_d = FFS_d + b_1 \cdot \sqrt{q_d} + b_2 \cdot q_o, \quad (2.15)$$

em que: ATS_d : velocidade média de viagem na direção observada (km/h);

FFS_d : velocidade de fluxo livre na direção oposta (km/h);

q_d : fluxo na direção observada (veic/h);

q_o : fluxo na direção oposta (veic/h); e

b_1, b_2 : parâmetros de calibração.

Moreno *et al.* [2014], na tentativa de representar correntes de tráfego tanto em condições básicas como não básicas para segmentos de rodovias de classe II, propuseram um modelo de regressão múltipla para estimar: (i) a velocidade média de viagem direcional com velocidade de fluxo livre de 100 km/h ($ATS_{d,100}$) ou 80 km/h ($ATS_{d,80}$); e (ii) a velocidade média de viagem direcional dos automóveis com velocidade de fluxo livre de 100 km/h ($ATScar_{d,100}$) ou 80 km/h ($ATScar_{d,80}$). Os modelos, obtidos para dados coletados em rodovias espanholas, são apresentados nas Equações 2.16 a 2.19. No referido trabalho, não foram mencionadas as condições geométricas das vias.

$$ATS_{d,100} = 129,265 - 6,03 \cdot \ln(q_d) - 0,314 \cdot P_{hv}, \quad (R^2 = 0,17) \quad (2.16)$$

$$ATS_{d,80} = 87,644 - 2,606 \cdot \ln(q_d), \quad (R^2 = 0,09) \quad (2.17)$$

$$ATScar_{d,100} = 140,12 - 8,555 \cdot \ln(q_d) - 0,288 \cdot P_{hv}, \quad (R^2 = 0,17) \quad (2.18)$$

$$ATScar_{d,80} = 89,295 - 2,912 \cdot \ln(q_d), \quad (R^2 = 0,10) \quad (2.19)$$

em que: q_d : fluxo na direção observada; e

P_{hv} : porcentagem de veículos pesados.

Percebe-se que, nos quatro casos, o coeficiente R^2 encontrado foi baixo, levando em conta que, para o desenvolvimento de modelos de tráfego, bons modelos teriam coeficientes R^2 maiores. Essa ressalva sobre a obtenção de modelos de tráfego e o valor do coeficiente é importante também nos comentários sobre outros modelos apresentados nesta tese.

O baixo valor de R^2 pode estar relacionado com a escolha de desenvolver modelos de regressão linear múltipla para representar condições não básicas. Outro fato que chama a atenção é a utilização de constantes nos modelos. Do ponto de vista prático, isso pode ocasionar uma inconsistência no modelo, pois, para q_d e P_{hv} muito baixos, a velocidade média de viagem poderia divergir bastante da velocidade de fluxo livre. Essa escolha também é feita pelo HBS; na Equação 2.14, proposta pelo manual, o parâmetro FFS_d é uma constante que deve ser determinada por regressão, não sendo, necessariamente, próxima da velocidade de fluxo livre da rodovia.

Para dados coletados no Brasil, destaca-se a adaptação do modelo linear do HCM2000 feita por Egami [2006] e por Mon-ma [2008], enquanto Bessa Jr. e Setti [2011a] também desenvolveram modelos côncavos para dados em condições básicas. No último caso, foi identificado um melhor ajuste aos dados para o modelo côncavo em relação ao modelo linear.

2.3.2. Densidade

A densidade é um parâmetro importante para avaliar a qualidade de serviço em rodovias não interrompidas, pois descreve a proximidade dos veículos [TRB, 2010, v.1, p. 4-6]. O HCM2010 usa a densidade para obter o nível de serviço em rodovias de pista dupla e autoestradas, mas não para rodovias de pista simples. O motivo para que não seja usada nesse caso é que a densidade não reflete, explicitamente, o desconforto dos motoristas por viajar atrás de veículos lentos.

O HBS2001, ao contrário do HCM, não considera medidas de desempenho que descrevem o desconforto do motorista ($PTSF$, por exemplo). Além disso, a velocidade, sozinha, não poderia ser considerada para tal tarefa, uma vez que, em alguns casos, como em regiões montanhosas, dificilmente a rodovia teria nível de serviço A ou B, mesmo em condições de fluxo livre. Isso ocorre porque a velocidade média de viagem é muito influenciada pelas condições

geométricas da via e pelos limites da velocidade. Para determinar o nível de serviço, o HBS2001 propõe usar a densidade dos automóveis (calculada pela relação entre o fluxo de tráfego total e a velocidade média desses veículos), considerando que a densidade descreve bem a proximidade entre os veículos e as condições operacionais, o que influi na qualidade de serviço percebida pelos motoristas [FGSV, 2005; Brilon e Weiser, 2006].

Van As [2003] propôs outra medida de desempenho semelhante: a densidade de veículos em pelotões (*FD*), definida como o número de veículos em pelotão por km. É uma alternativa diferente da densidade, pois está relacionada com o desconforto dos motoristas em pelotões. Uma vantagem dessa medida de desempenho é que, em seu cálculo, considera-se a velocidade média de viagem (Equação 2.20), o que diminui a necessidade de usar outra medida para avaliar o nível de serviço. A porcentagem de veículos em pelotões (*PF*) corresponde à proporção de *headways* menores ou iguais a um valor crítico (HCM2010 recomenda 3 s).

$$FD = PF \cdot \left(\frac{q}{ATS} \right), \quad (2.20)$$

em que: *FD* : densidade de veículos em pelotões (veic/km);

PF : porcentagem de veículos em pelotões;

q : fluxo de tráfego (veic/h); e

ATS : velocidade média de viagem (km/h).

Com a utilização da densidade para automóveis, há uma homogeneidade na análise dos tipos de estradas, uma vez que é a mesma medida usada na avaliação da qualidade de serviço em rodovias de pista dupla e em autoestradas. Van As [2003] apresenta um critério para que os níveis de serviço fossem definidos com base em *FD* (Tabela 2.6).

Tabela 2.6: Nível de serviço em função da densidade de veículos em pelotões [Van As, 2003]

<i>NS</i>	Intervalo de <i>FD</i> (veic/km)
A	$FD \leq 1,4$
B	$1,4 < FD \leq 3,3$
C	$3,3 < FD \leq 6,7$
D	$6,7 < FD \leq 9,5$
E	$FD > 9,5$

Alguns trabalhos [Catbagan e Nakamura, 2006; Al-Kaisy e Karjala, 2008] estudaram a densidade de veículos em pelotões. Modelos de regressão foram obtidos com intuito de rela-

cionar FD com outras variáveis, tais como os fluxos direcional e oposto; a velocidade média; as porcentagens de veículos pesados; e as zonas com ultrapassagens proibidas. Altas correlações foram obtidas e FD foi fortemente recomendada pelos autores como uma medida de desempenho para rodovias de pista simples.

Moreno *et al.* [2014] também propuseram dois modelos de regressão linear múltipla para FD , tendo sido encontrado alto valores para o coeficiente de determinação R^2 :

$$\ln(FD) = -9,5670 + 1,9610 \cdot \ln(q_d) + 0,0051 \cdot P_{hv}, \quad (R^2 = 0,86) \quad (2.21)$$

$$FD = -0,2083 + 0,0080 \cdot q_d - 0,0003 \cdot q_o + 0,0012 \cdot P_{hv}, \quad (R^2 = 0,95) \quad (2.22)$$

Um cuidado maior poderia ter havido com relação aos sinais dos coeficientes. Um exemplo é o sinal negativo para o coeficiente de q_o da Equação 2.22, que mostra que ela é inversamente proporcional à FD , o que não faz sentido. Provavelmente, q_o não tem uma significância grande para o modelo e isso é um problema comum a outros modelos apresentados neste capítulo, como as Equações 2.24 e 2.25 apresentadas a seguir, também para estimar FD .

ODOT [2010] foi além e desenvolveu modelos de regressão linear múltipla para as classes de rodovias de pista simples propostas pelo HCM2010, como pode ser visto nas Equações 2.23 a 2.25 para as classes I, II e III, respectivamente, para relevo plano. Os coeficientes são considerados bons, em torno de 0,80.

$$FD = -0,192 + 0,0060 \cdot q_d + 0,00052 \cdot q_o + 0,00067 \cdot P_{hv} + 0,00024 \cdot \%NPZ, \quad (R^2 = 0,81) \quad (2.23)$$

$$FD = -0,178 + 0,0062 \cdot q_d - 0,00016 \cdot q_o + 0,00062 \cdot P_{hv} + 0,00061 \cdot \%NPZ, \quad (R^2 = 0,75) \quad (2.24)$$

$$FD = -0,041 + 0,0032 \cdot q_d - 0,00032 \cdot q_o + 0,00011 \cdot P_{hv} + 0,00019 \cdot \%NPZ, \quad (R^2 = 0,74) \quad (2.25)$$

em que: $\%NPZ$: porcentagem de zonas de ultrapassagens proibidas.

ODOT [2010] também apresenta dados da FD coletados em campo de acordo com a classe da rodovia, como mostra a Figura 2.6 para uma rodovia de classe I. A nuvem de pontos sugere que um modelo polinomial poderia ser ajustado, como um modelo quadrático.

Figura 2.6: Dados de campo da *FD* e do fluxo de tráfego para uma rodovia de classe I [ODOT, 2010]

Baseado no critério do HCM2010 para determinar o nível de serviço em função da *PTSF*, em que os volumes de serviço foram encontrados, ODOT [2010] propôs um critério para cálculo do nível de serviço em função da *FD* (Tabela 2.7). Esse método é bastante utilizado quando se propõe obter critérios para determinar o nível de serviço a partir de outras medidas de desempenho diferentes da *PTSF*. Outros critérios apresentados ao longo deste capítulo são obtidos assim.

Tabela 2.7: Nível de serviço com base na densidade de veículos em pelotões, em função da classe da rodovia [ODOT, 2010]

NS	Intervalo de <i>FD</i> (veic/km)	
	Classe I	Classe II
A	$FD \leq 2,0$	$FD \leq 2,5$
B	$2,0 < FD \leq 3,5$	$2,5 < FD \leq 4,0$
C	$3,5 < FD \leq 6,0$	$4,0 < FD \leq 6,5$
D	$6,0 < FD \leq 9,0$	$6,5 < FD \leq 10,0$
E	$FD > 9,0$	$FD > 10,0$

Para calcular a *FD*, há necessidade de obter a porcentagem de veículos em pelotões (proporção de *headways* menores do que um valor crítico) e o fluxo de tráfego em um ponto da rodovia, enquanto que a velocidade média dos veículos pode ser obtida em um ponto representativo de um segmento da rodovia, ou medida para todo o segmento. No caso da densidade

da corrente de tráfego, geralmente ela é calculada em campo por meio da relação entre o fluxo de tráfego e a velocidade média (em um ponto representativo ou para todo o segmento).

2.3.3. Pelotões

Embora, em alguns casos, a velocidade média de viagem seja usada como único critério para determinar o nível de serviço [Arazoza e McLeod, 1993], geralmente ela é usada juntamente com outra medida de desempenho para realizar essa estimativa. Essas medidas são principalmente relacionadas com a formação de pelotões e com o consequente desconforto dos motoristas por viajar atrás de outros veículos lentos.

Uma dessas alternativas é o comprimento médio do pelotão [Pursula e Enberg, 1991]. Sua obtenção em campo pode ser feita como apresentado na Equação 2.26, como proposta por [Polus e Cohen, 2009]. Romana [1994] lembra que essa medida está relacionada matematicamente com a porcentagem de veículos em pelotão (PF), não sendo recomendável a utilização das duas medidas de desempenho conjuntamente.

$$APL = Q_o + 1, \quad (2.26)$$

em que: APL : comprimento médio do pelotão (veic);

Q_o : número médio de *headways* em pelotões.

Alguns autores [Botma, 1986; Romana, 1994] têm apontado a porcentagem de veículos em pelotão como uma boa medida de desempenho, especialmente por ser de fácil obtenção em campo, por refletir de alguma maneira o desconforto do condutor e por ter relação com a possibilidade de realizar ultrapassagens. Por outro lado, exige uma definição clara sobre qual é o *headway* crítico para determinar um pelotão e exige a coleta desses *headways* em pontos de controle da estrada, valores que podem variar muito no tempo e no espaço.

Na tentativa de encontrar uma maneira de obter a $PTSF$ a partir de dados de campo, Al-Kaisy e Durbin [2007] propuseram um método que se baseava em dados coletados em um ponto da rodovia. Por se tratar de uma medida de desempenho pontual, ao invés de uma medida de desempenho que considera todo o segmento de uma rodovia, os autores chamaram essa estimativa da $PTSF$ de “Porcentagem de Veículos Retidos” (Percent Impeded – PI). Por definição, PI seria a porcentagem de veículos que estão impedidos de viajar livremente devido à presença de veículos lentos num ponto de observação.

Os autores propuseram duas maneiras de calcular PI . Uma delas foi considerada mais promissora por um dos autores em um artigo posterior [Al-Kaisy e Freedman, 2010]; duas condições estabelecem que um veículo possa estar impedido por outro mais lento: (i) um *headway* curto em relação ao veículo a frente; e (ii) uma velocidade de percurso que é menor do que uma velocidade desejada. Dessa maneira, PI deve ser calculada conforme a equação:

$$PI = P_p \cdot P_i, \quad (2.27)$$

em que: P_p : probabilidade de um veículo ser parte de um pelotão a partir dos *headways*; e

P_i : probabilidade de um veículo estar impedido por viajar a uma velocidade menor do que sua velocidade desejada.

O valor de P_p pode ser estimado como a porcentagem de veículos em pelotões (PF), que se baseia na proporção de *headways* com valores menores ou iguais a um valor crítico (3 s, por exemplo). No entanto, embora isso indique veículos que estão próximos, não necessariamente representa que estão retidos se determinado veículo está viajando com sua velocidade desejada. Por isso, faz-se necessário estimar uma proporção de P_p (representado por P_i) que estejam abaixo dessa velocidade, o que determinaria a porcentagem de veículos retidos PI .

Para estimar P_i , um método proposto consiste em obter, primeiramente, a velocidade média de “veículos lentos”. Uma boa amostra para esses veículos consiste nos líderes dos pelotões. Em seguida, determina-se a distribuição de frequência das velocidades dos veículos que estão fora dos pelotões e, inclusive, dos veículos líderes. Dessa maneira, a distribuição de frequência obtida não tem influência dos veículos que tiveram interação com os líderes dos pelotões. Finalmente, P_i representa o percentil dessa distribuição que corresponde a velocidade dos veículos lentos calculada anteriormente.

O uso de PI como medida de desempenho parece razoável, uma vez que pode ser obtida diretamente em campo. Sua aproximação com a $PTSF$ merece ser melhor estudada em trabalhos futuros, mas pode representar uma alternativa no que se trata de uma medida de desempenho que reflita o desconforto do usuário de viajar atrás de veículos lentos.

A partir de dados coletados em campo, Moreno *et al.* [2014] encontraram os seguintes modelos para estimar APL e PI , tendo sido obtido um valor baixo de R^2 para ambos os casos (Equações 2.28 e 2.29). No primeiro modelo, a variável dependente $\%NPZ$ é inversamente proporcional à variável APL , o que não faz sentido. O mesmo ocorre entre P_{hv} e PI para o

segundo modelo. Isso pode indicar que a significância de algumas variáveis independentes no modelo deveria ser revista.

$$\frac{1}{APL} = 0,663 - 0,093 \cdot \ln(q_d) + 0,001 \cdot \%NPZ, \quad (R^2 = 0,36) \quad (2.28)$$

$$PI = -36,728 + 15,7086 \cdot \ln(q_d) - 0,1123 \cdot P_{hv}, \quad (R^2 = 0,59) \quad (2.29)$$

Avaliando-se a *PF* como medida de desempenho, Al-Kaisy e Karjala [2008] e Moreno *et al.* [2014], a partir de dados obtidos em campo, se propuseram, mais uma vez, a desenvolver modelos de regressão linear, como mostra as Equações 2.30 e 2.31, respectivamente para os dois estudos. Nesses casos, apesar das variáveis explicativas serem distintas, os coeficientes R^2 foram semelhantes, em torno de 0,63, considerado um valor razoável para modelos de tráfego.

$$PF = 0,034 \cdot q_d - 0,0002 \cdot q_o - 0,031 \cdot P_{hv} + 0,005 \cdot \%NPZ + 0,012 \cdot sd_{FFS}, \quad (R^2 = 0,62) \quad (2.30)$$

$$PF = -60,693 + 24,429 \cdot \ln(q_d), \quad (R^2 = 0,63) \quad (2.31)$$

em que: sd_{FFS} : desvio padrão da velocidade de fluxo livre (mi/h).

A *PTSF* está relacionada com a formação dos pelotões, mas, devido à sua dificuldade de obtenção em campo, vários autores [Pursula, 1995; Laval, 2006; Cohen e Polus, 2011] propuseram estimar a *PTSF* a partir de outros dados facilmente coletados em rodovias. Devido à sua grande importância, a revisão desses artigos, assim como a aplicação desses modelos aos dados coletados nesta pesquisa, está apresentada no Capítulo 5.

Os coeficientes da Equação 2.30 permite uma análise mais minuciosa acerca do uso de modelos empíricos. Os coeficientes das variáveis dependentes q_o e P_{hv} indicam que, quanto maiores forem os seus valores, menores valores da variável independente *PF* serão encontrados. O senso comum indica que deveria ocorrer exatamente o inverso. Sendo assim, ou essas variáveis não deveriam ter sido incluídas no modelo (embora possa haver correlações significativas), ou deveria haver restrições quanto ao espaço de busca do parâmetro, evitando-se valores negativos.

2.3.4. Ultrapassagens

Sabe-se que, em rodovias de pista simples, as ultrapassagens ocorrem com o veículo ocupando a faixa de tráfego no sentido oposto. Assim, ela pode ocorrer quando a demanda e a oferta

dessa manobra coincidem no tempo e no espaço. A demanda por ultrapassagens é uma consequência das diferenças de velocidades entre os veículos, enquanto que as oportunidades de ultrapassagens ocorrem quando há um *headway* e uma distância de visibilidade suficientes no sentido oposto. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos para representar o fenômeno das ultrapassagens, como bem resume McLean [1989].

Em rodovias de pista simples, a qualidade do tráfego percebida pelos usuários tende a ser sensível às oportunidades de ultrapassagens e, conseqüentemente, à divisão direcional. Com base nisso, Morral e Werner [1990] propuseram como medida de desempenho a “taxa de ultrapassagens”, definida como a relação entre o número de ultrapassagens realizadas e o número de ultrapassagens desejadas em um determinado segmento. A qualidade do serviço está relacionada com o número de ultrapassagens desejadas (demanda) frente à oferta existente. A formação de pelotões ocorre quando a demanda é maior do que a oferta, o que gera insatisfação dos usuários. A situação é agravada quando a via tem uma geometria ruim, ou mitigada quando existe uma faixa adicional [Morral e Werner, 1990].

Morral e Werner [1990], para obter a taxa de ultrapassagens, realizaram experimentos com o simulador TRARR [Hoban *et al.*, 1991]. Dada sua complexidade, a obtenção da taxa de ultrapassagens em campo pode ser considerada complicada, uma vez que é necessário determinar o número de ultrapassagens realizadas e desejadas pelos motoristas.

Para obter o número de ultrapassagens em um dado sentido de uma rodovia, Romana [1994] propôs o seguinte método: por meio de filmadoras posicionadas nas extremidades dos segmentos, registra-se a ordem de passagem dos veículos. Dessa forma, há como determinar o número de ultrapassagens de acordo com as alterações nas sequências dos veículos em cada extremidade. Esse método tende a ficar mais confiável quanto maior for o número de câmeras posicionadas no segmento de estudo.

Para determinar o número de ultrapassagens desejadas, o problema é mais complicado, uma vez que o conceito de “desejado” é útil, porém não pode ser obtido diretamente em campo. Para resolver o problema, têm sido usadas duas soluções: a partir de modelos analíticos e por meio de simulação microscópica [McLean, 1989; Virkler e Guell, 1991]. No tocante aos simuladores de tráfego de rodovias de pista simples, os principais softwares fornecem resultados acerca das ultrapassagens desejadas, com destaque para o CORSIM, que fornece informações sobre as manobras de cada veículo a cada segundo.

O principal modelo analítico encontrado na literatura para obter o número de ultrapassagens em um segmento é o modelo de Wardrop, como mostra a Equação 2.32 [McLean, 1989, p. 324; Virkler e Guell, 1991].

$$\phi = \frac{2 \cdot \sigma \cdot q^2}{u^2 \cdot \sqrt{\pi}}, \quad (2.32)$$

em que: ϕ : número de ultrapassagens (ultrapassagens/km.h);

q : fluxo de tráfego (veic/h);

σ : desvio padrão das velocidades dos veículos fora dos pelotões; e

u : velocidade média dos veículos fora dos pelotões (km/h).

A taxa de ultrapassagens pode ser considerada uma boa medida de desempenho, teoricamente bem estabelecida. No entanto, *a priori*, não parece adequada para ser escolhida para determinar o nível de serviço. Além disso, é necessário estabelecer, com clareza, qual é a correlação entre as ultrapassagens e o ganho no desempenho da viagem por parte dos motoristas, expresso, principalmente, em função do tempo de viagem. Como Romana [1994] chama atenção, essa variável não é de fácil aplicação pelos usuários, pois, para ser calculada, deveriam ser usados modelos analíticos e simuladores microscópicos de tráfego.

2.3.5. Outras medidas de desempenho

Algumas pesquisas apresentaram medidas de desempenho partindo do princípio de que poderiam ser obtidas diretamente da observação do tráfego. Dentre as medidas de desempenho ainda não citadas neste trabalho, estão: (i) o atraso percentual [Yu e Washburn, 2009]; e (ii) a intensidade do tráfego (ρ) e a liberdade do fluxo (η) [Polus e Cohen, 2009].

O atraso percentual (PD), uma medida de desempenho proposta por Yu e Washburn [2009], é definida como a relação entre o atraso médio de uma viagem ao longo de um segmento e o tempo de viagem ideal ou desejado, aquele que ocorre quando o veículo se desloca na velocidade de fluxo livre (Equação 2.33). O atraso médio de viagem consiste na diferença entre o tempo médio de viagem de um veículo no segmento (ATT) e o tempo médio de viagem caso se tivesse na FFS (ATT_{FFS}).

$$PD = \frac{ATT - ATT_{FFS}}{ATT_{FFS}} \times 100, \quad (2.33)$$

sendo ATT : tempo médio de viagem em um segmento (s); e

ATT_{FFS} : tempo médio de viagem se a velocidade média de viagem fosse igual à velocidade de fluxo livre (s).

Ao contrário de outras medidas de desempenho, PD reflete uma situação que ocorre ao longo de um segmento, e não em um ponto específico da via. Seu uso pode ser interessante, uma vez que promove uma abordagem que pode ser aplicada para locais com velocidade de fluxo livre distintas. O atraso percentual tem a velocidade média de viagem incluída em seu conceito, pois é usada para calcular o tempo de viagem. Li e Washburn [2014] ainda propuseram um critério para definir o nível de serviço com base no atraso percentual para rodovias de pista simples em função da classe da rodovia, como mostra a Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Nível de serviço em função do atraso percentual [Li e Washburn, 2014]

NS	Intervalo de PD (%)		
	Rodovia de classe I	Rodovia de classe II	Rodovia de classe III
A	$\leq 9,0$	$\leq 12,0$	$\leq 9,5$
B	9,0 – 14,0	12,0 – 16,0	9,5 – 21,5
C	14,0 – 20,5	16,0 – 23,0	21,5 – 36,5
D	20,5 – 30,0	23,0 – 36,5	36,5 – 55,5
E	$> 30,0$	$> 36,5$	$> 55,5$

O critério proposto consiste, primeiramente, em determinar os volumes de serviço propostos pelo HCM2010 que indicam as mudanças de nível de serviço para uma rodovia em condições básicas (baseado em ATS ou em $PTSF$). Com esses fluxos, encontram-se os intervalos que indicam a mudança de nível de serviço com base em numa medida de desempenho, também para uma rodovia em condições básicas (somente automóveis, segmento plano e sem curvas, etc.).

A Figura 2.7 mostra um exemplo apresentado em Li e Washburn [2014] para obter o critério para calcular o nível de serviço baseado em PD de uma rodovia de Classe II. Na figura, há um destaque para encontrar o intervalo que determina o nível de serviço A, que, no HCM2010, é para segmentos com $PTSF < 35$.

Figura 2.7: Método para obter os volumes de serviço de cada nível de serviço com base em *PD* a partir do critério do HCM2010, com destaque para obter o intervalo que determina o nível de serviço A [Li e Washburn, 2014]

O atraso percentual tem um conceito semelhante à porcentagem de fluxo livre usada no HCM2010 para rodovias de pista simples de classe III, que são aquelas localizadas em áreas rurais pouco acessadas. Nesta pesquisa, o atraso percentual poderia ser usado para as diferentes classes de rodovias, desde que os critérios para definição dos níveis de serviço fossem específicos para cada caso.

Polus e Cohen [2009] propuseram outras duas medidas de desempenho para rodovias de pista simples, determinadas a partir de variáveis que podem ser observadas em campo – o número médio de veículos dentro e fora dos pelotões, Q_0 e N_0 , respectivamente. As formulações para a intensidade do tráfego (ρ) e para a liberdade do fluxo (η) são:

$$\rho = 1 - \frac{1}{Q_0}, \quad (2.34)$$

$$\eta = \frac{N_0}{\rho} = \frac{N_0}{\left(1 - \frac{1}{Q_0}\right)}, \quad (2.35)$$

A intensidade do tráfego é uma variável comum em teoria das filas. Na abordagem proposta pelos autores, representa a relação entre o tempo gasto pelo primeiro veículo atrás de um veículo lento e o intervalo médio de chegadas à fila formada por esse veículo lento. Sendo assim, quanto mais próximo de 1 for o ρ , mais “intenso” será o tráfego em razão da grande formação de filas.

A liberdade do fluxo é definida como a razão entre o tempo de viagem médio para os veículos fora dos pelotões e o tempo gasto por um veículo rápido desde a sua chegada atrás de um veículo lento até o momento em que ele inicia uma ultrapassagem. Quanto maior for η , maior será a liberdade do seu tempo de viagem *versus* o tempo gasto em pelotões, que tende a ser pequeno. Com base em teoria das filas, é possível constatar que $\eta = N_0/\rho$ e, assim, apresenta a formulação da Equação 2.35. Polus e Cohen [2009] fortemente recomendam a liberdade do fluxo como substituta da *PTSF* como medida de desempenho. Por conta disso, os autores propuseram um critério de obtenção do nível de serviço com base em η (Tabela 2.9), encontrado usando-se um método semelhante daquele usado por Li e Washburn [2014].

Tabela 2.9: Nível de serviço em função da liberdade do fluxo (η) [Polus e Cohen, 2009]

NS	Intervalo de η
A	$\geq 16,5$
B	7,1 – 16,5
C	4,1 – 7,1
D	2,8 – 4,1
E	1,8 – 2,8
F	$\leq 1,8$

Moreno *et al.* [2014] também encontraram modelos para estimar ρ e η (Equações 2.36 e 2.37). Nos dois casos, o coeficiente de determinação R^2 foi ruim, abaixo de 0,50; a significância e os sinais dos coeficientes das variáveis independentes também deveriam ser revistos.

$$\rho = -0,117 + 0,174 \cdot \ln(q_d) - 0,002 \cdot P_{hv} - 0,003 \cdot \%NPZ, \quad (R^2 = 0,34) \quad (2.36)$$

$$\frac{1}{\eta} = -0,325 + 0,145 \cdot \ln(q_d) - 0,002 \cdot \%NPZ, \quad (R^2 = 0,50) \quad (2.37)$$

2.3.6. Considerações finais

Tendo sido realizada uma revisão da literatura sobre as medidas de desempenho em rodovias de pista simples, e baseadas em suas definições, é possível organizá-las em duas categorias: (i) as que estão relacionadas com o desempenho operacional da via; e (ii) as que refletem o desconforto do motorista em pelotões.

Na primeira categoria, estão a velocidade média de viagem, o atraso percentual e a densidade dos automóveis. Na segunda categoria, está a porcentagem de tempo viajando em pelotões, a porcentagem de veículos em pelotões, a porcentagem de veículos retidos, o tamanho

médio dos pelotões, a densidade de veículos em pelotões, a taxa de ultrapassagens, a intensidade do tráfego e a liberdade do fluxo. Geralmente, são usados critérios para determinar o nível de serviço que usam os dois tipos de medidas de desempenho. Uma única medida de desempenho também poderia ser usada, desde que fosse caracterizada como pertencente às duas categorias (densidade de veículos em pelotões, por exemplo).

Foram, também, citadas formas de coletar as medidas de desempenho em campo, o que permite organizá-las nas seguintes categorias: (i) obtidas para um segmento de estrada; e (ii) coletada em uma seção de controle. Da primeira categoria, pertence o atraso percentual, a velocidade média de viagem, a densidade dos automóveis, a porcentagem de tempo viajando em pelotões e a taxa de ultrapassagens; na segunda estão a porcentagem de veículos em pelotões, a porcentagem de veículos retidos, o tamanho médio dos pelotões, a densidade de veículos em pelotões, a intensidade do tráfego e a liberdade do fluxo. Considera-se a primeira categoria mais adequada, pois, de outra forma, a escolha de uma seção de controle deverá ser feita com muito critério para não divergir do restante do segmento.

É importante ressaltar que as medidas de desempenho escolhidas para avaliar a qualidade de serviço devem ser fáceis de serem obtidas. A Figura 2.8 mostra as principais vantagens e desvantagens de cada medida de desempenho mencionada e servirá de base para orientar a análise desenvolvida nas seções seguintes.

Medida de desempenho	Vantagens	Desvantagens
<i>Atraso percentual</i>	Fácil obtenção em campo Considera <i>ATS</i> no cálculo	Não considera o desconforto do motorista em pelotão
<i>Porcentagem de veículos em pelotões</i>	Fácil obtenção em campo Reflete o desconforto do motorista em pelotão	Coletada para um ponto da estrada Muito dispersa e gera incerteza
<i>Tamanho médio dos pelotões</i>	Fácil obtenção em campo Reflete o desconforto do motorista em pelotão	Coletada para um ponto da estrada Muito dispersa e gera incerteza
<i>Densidade de veículos em pelotões</i>	Fácil obtenção em campo Pode ser usada para outros tipos de rodovias Pouco dispersa Reflete o desconforto do motorista em pelotão	Como possui <i>PF</i> em seu cálculo, considera-se que é coletada para uma seção de estrada

Figura 2.8: Vantagens e desvantagens das medidas de desempenho estudadas

Medida de desempenho	Vantagens	Desvantagens
<i>Densidade dos automóveis</i>	Fácil obtenção em campo Pode ser usada para outros tipos de rodovias Pouco dispersa Reflete a proximidade dos veículos	Não reflete o desconforto do motorista em pelotão
<i>Intensidade do tráfego</i>	Fácil obtenção em campo Reflete o desconforto do motorista em pelotão	Coletada para um ponto da estrada Muito dispersa e gera incerteza
<i>Liberdade do fluxo</i>	Fácil obtenção em campo Reflete o desconforto do motorista em pelotão	Coletada para um ponto da estrada Muito dispersa e gera incerteza
<i>Velocidade média de viagem</i>	Fácil obtenção em campo Historicamente conhecida e muito estudada Usada em outros métodos conhecidos (HCM2010 e HBS2001)	Não considera o desconforto do motorista em pelotão
<i>Porcentagem de tempo viajando em pelotões</i>	Historicamente conhecida e muito estudada Reflete bem o desconforto dos motoristas em pelotões	Impossibilidade de obtenção em campo Coletada em campo com medidas <i>proxy</i> ou por meio de modelos analíticos com muitas variáveis
<i>Porcentagem de veículos retidos</i>	Reflete bem o desconforto dos motoristas em pelotões Possibilidade de obtenção em campo	Coletada para um ponto da estrada Muito dispersa e gera incerteza
<i>Taxa de ultrapassagens</i>	Reflete bem o desconforto dos motoristas	Impossibilidade de obtenção em campo Coleta em campo com medidas <i>proxy</i> ou por meio de modelos analíticos com muitas variáveis

Figura 2.8 (Cont.): Vantagens e desvantagens das medidas de desempenho estudadas

3. Coleta e tratamentos dos dados

Esta seção trata da coleta e do tratamento dos dados de tráfego que foram usados com dois propósitos: (i) calibrar e validar o simulador CORSIM; e (ii) avaliar a adequabilidade dos modelos de tráfegos desenvolvidos. Foram obtidos os seguintes tipos de dados:

- Por meio de filmadoras: para ajustar os parâmetros comportamentais do CORSIM; esse método permite obter os dados de tráfego de maneira mais controlada e, por essa razão, foram os únicos dados usados para validar os modelos de tráfego desenvolvidos;
- Provenientes de sensores permanentes de tráfego: usados para estimar o *headway* mínimo típico das rodovias, valor informado como *input* do simulador; foram usados também para planejar as filmagens e estimar a velocidade de fluxo livre direcional em alguns casos (*input* do CORSIM); e
- A partir do uso de GPS: alinhamentos horizontal e vertical, zonas de ultrapassagens proibidas e faixas adicionais das rodovias; sobre o peso, a potência e as curvas de desempenho de caminhões que trafegavam em uma rodovia paulista, usados para calibrar e validar o modelo de desempenho do simulador.

O método de coleta, as informações sobre os locais observados e a forma como os dados foram tratados são apresentados a seguir.

3.1. Dados de tráfego obtidos com filmadoras

O método de obtenção dos dados com filmadoras, também usado em outras pesquisas [Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr., 2009], consiste em posicionar câmeras de vídeo nas extremidades e em pontos intermediários de segmentos selecionados. A extração dos dados desejados é feita por meio da posterior observação das filmagens, com as informações obtidas podendo ser agregadas em intervalos predeterminados, usualmente de 15 minutos [Romana, 1994].

Os dados obtidos com filmadoras neste trabalho complementam um conjunto que vem sendo formado ao longo de alguns anos, coletado com o intuito principal de calibrar e validar

simuladores de rodovias de pista simples. Esses dados são provenientes de três pesquisas anteriores: (i) Egami [2006], que procurou adaptar o método do HCM2000 para estradas sem faixas adicionais no Brasil usando o simulador TRARR; (ii) Mon-Ma [2008], que adaptou o HCM2000 para rodovias com faixas adicionais utilizando o software TWOPAS; e (iii) Bessa Jr. [2009], que também usou o TWOPAS com o objetivo de identificar abordagens que pudessem servir para avaliar a qualidade de serviço em rodovias de pista simples brasileiras, sem, necessariamente, seguir a estrutura do HCM2000.

Nos dois primeiros trabalhos, as coletas foram realizadas em dez segmentos de rodovias de pista simples em condições de fluxo bem abaixo da capacidade, sendo recomendado que os modelos adaptados fossem recalibrados considerando-se fluxos mais elevados. Essa indicação foi levada em consideração na pesquisa de Bessa Jr. [2009], quando foram realizadas coletas de dados em um segmento da SP-98 durante as férias de verão em novembro e em dezembro de 2008, tendo sido observados fluxos direcionais de mais de 1300 veic/h. Nos três trabalhos citados, foram realizadas duas coletas em cada segmento, sendo uma orientada para calibração e outra para validação do simulador. A Figura 3.1 ilustra a distribuição dos pontos fluxo-velocidade obtida nessas três pesquisas, em intervalos de agregação de 15 minutos.

Figura 3.1: Dados de fluxo e velocidade unidirecionais (a) e bidirecionais (b) observados em campo por meio de filmadoras em trabalhos anteriores

Na Figura 3.1, percebe-se que a magnitude dos fluxos de tráfego não é alta, fato comum em rodovias de pista simples. Além disso, não havia registros para fluxos intermediários, como, por exemplo, entre 400 e 900 veic/h para fluxos direcionais, e nem para valores próximos à capacidade (fluxo bidirecional máximo é próximo de 1500 veic/h). Assim como no trabalho de Bessa Jr. [2009], que fez coletas de dados na SP-98, esta pesquisa procurou observar luga-

res para coletar dados em campo que complementassem o conjunto de informações observado até então.

Diferentemente das coletas de dados realizadas em outros trabalhos, neste trabalho foi desenvolvido um equipamento com o intuito de substituir o conjunto de filmagem câmera + tripé, que é bastante semelhante aos radares usados para fiscalização de velocidade (Figura 3.2) e costuma ser percebido dessa forma pelos motoristas. O uso de uma filmadora posicionada sobre um tripé pode ocasionar problemas durante a coleta de dados, tendo ocorrido casos em que foi necessária, inclusive, a paralisação das filmagens e a alteração dos pontos de observações previamente estabelecidos, visando evitar que, ao avistar a câmera no tripé, os motoristas freassem bruscamente.

Figura 3.2: Conjunto para filmagem do tráfego: câmera + tripé

Na tentativa de solucionar esse problema, foi desenvolvido um equipamento que utiliza balizadores de tráfego para esconder a filmadora tanto quanto possível. Busca-se, assim, evitar possíveis colisões traseiras e preservar a integridade física dos envolvidos (motoristas e pesquisadores).

A Figura 3.3 ilustra o processo de montagem do equipamento desenvolvido. A Figura 3.3a mostra que, primeiramente, foi feito um corte a 14 cm do topo do balizador, criando um tipo de “cabeça” em que foi feito um furo para passagem da lente da câmera. Na Figura 3.3b, é possível ver o “corpo” do balizador.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 3.3: Etapas da montagem do equipamento para realização de filmagens de tráfego

A Figura 3.3c ilustra a montagem de uma “plataforma”, de 185 mm de diâmetro, 5 mm de espessura e feita de alumínio, para fixar a câmera no topo do “corpo” do balizador. A Figura 3.3d mostra o “corpo” e a “cabeça” do balizador com a filmadora. A parte de baixo do equipamento que foi reforçada com um disco metálico de 280 mm de diâmetro e 15 mm de espessura para evitar maiores vibrações em campo. Nessa “base”, foram colocados três parafusos pontiagudos, dispostos a 120° e com porcas passantes para uma maior fixação ao solo e regulação da altura e nivelamento. A Figura 3.3e mostra o equipamento montado com uma faixa amarela refletiva (ver parte de baixo da Figura 3.3b) posicionada na junção do corpo com a cabeça do balizador para não chamar a atenção dos motoristas em campo.

O conjunto balizador + câmera (Figura 3.4) foi posicionado próximo à estrada sem chamar a atenção dos usuários, enquanto os pesquisadores ficavam afastados do equipamento registrando a placa e o tipo dos veículos por meio de um gravador de voz. Após as coletas, as informações provenientes das câmeras e dos gravadores foram cruzadas para obter os tipos dos veículos, as placas e os instantes de passagem nas seções de controle, de acordo com o método apresentado em Romana [1994]. Com esses dados, foi possível calcular as distribuições das velocidades médias de viagem e dos *headways*, usadas para compor o *fitness* a ser maximizado durante a calibração.

Figura 3.4: Equipamento para realização de filmagens de tráfego

Solucionado o problema do equipamento de filmagem, as coletas de dados foram planejadas. Foram estudadas séries históricas de dados de volume em vários locais com sensores de tráfego (mais detalhes sobre esse tipo de dado no item a seguir). Foram analisadas as séries

dos últimos dois anos disponíveis e em meses semelhantes ao que se pretendia realizar as coletas. Foram avaliadas as variações de fluxo em semana semelhante à desejada, além das semanas anterior e posterior a esta.

Analizadas as séries históricas, foram realizadas vistorias nos locais para identificação de seis pontos de observação em cada segmento selecionado, que era o número máximo de câmeras disponíveis. Foram realizadas quatro coletas de dados, sendo que a primeira, na SP-123, foi realizada da maneira tradicional, com tripé, câmeras e pesquisadores ao lado do equipamento para registro do áudio com as placas veiculares. Os seguintes locais foram filmados:

- SP-123, que liga as cidades de Taubaté e Campos do Jordão, em 9 de julho de 2010, durante um feriado estadual. O período foi entre 9:00 h e 10:00 h, entre os kms 5,1 e 10,6; e entre 12:00 h e 15:00 h, entre o km 7,9 e o km 13,3. Foram observados fluxos bidirecionais entre 1000 e 1500 veic/h;
- SP-308, entre as cidades de Salto e Capivari, em 3 de abril de 2012, durante uma terça-feira. O período foi entre 14:00 h e 18:00 h e o segmento estudado foi entre o km 102,5 e o km 108,0. Foram registrados fluxos bidirecionais entre 450 e 650 veic/h;
- SP-300, que liga as cidades de Tietê e Laranjal Paulista, em 4 de abril de 2012, numa quarta-feira. O período foi entre 14:00 h e 18:00 h e o segmento estudado foi entre o km 168,5 e o km 172,5. Foram observados fluxos bidirecionais entre 500 e 750 veic/h; e
- SP-270, entre as cidades de Alumínio e Sorocaba, em 11 de abril de 2012, numa quarta-feira. O período foi entre 14:00 h e 18:00 h e o segmento estudado foi entre o km 82,0 e o km 89,0. Foram observados fluxos bidirecionais entre 750 e 1000 veic/h.

A Figura 3.5 apresenta os pontos fluxo-velocidade coletados nos locais apresentados acima juntamente com os dados provenientes de pesquisas anteriores. Percebe-se que foram obtidos alguns intervalos de fluxo que não haviam sido registrados antes, diminuindo também a discrepância entre fluxos de tráfego baixos e altos.

Figura 3.5: Pontos fluxo-velocidade unidirecionais (a) e bidirecionais (b) obtidos em campo com filmadoras em trabalhos anteriores e nesta pesquisa (SP-123, SP-300, SP-308 e SP-270)

Mesmo havendo uma maior homogeneização do conjunto de dados, procurando-se obter uma quantidade próxima de dados com fluxos altos e baixos, ainda havia a necessidade de buscar mais dados, se fosse possível. Vistorias foram realizadas em outras estradas paulistas em busca de um local em que fossem observados fluxos elevados, mas, também, fluxos intermediários (fluxos bidirecionais entre 600 e 1000 veic/h).

Assim, foi selecionado um segmento da SPA-110/330, entre o km 5,0 e o km 6,5, rodovia de pista simples que liga a rodovia Anhanguera a uma das entradas de Paulínia. Nesse local, há um grande fluxo de automóveis e caminhões em dias típicos, especialmente nos períodos do pico da manhã e do pico da tarde. O segmento é considerado plano e reto, sem faixas adicionais devido ao seu tamanho curto. Um local assim é considerado raro, uma vez que, em muitos casos, já teria sido duplicada (o que poderá ocorrer em alguns anos). Assim, foi obtida uma grande quantidade de coletas de dados nos seguintes dias e horários:

- 28 de fevereiro de 2013, das 17:00 h às 19:00 h;
- 12 de fevereiro de 2014, das 13: 00 às 18:00 h;
- 20 de março de 2014, das 6:30 h às 10:30 h; e
- Entre 27 e 29 de maio de 2014, das 7:00 h às 11:30 h e das 13:30 h às 18:00 h.

Com as coletas na SPA-110/330, foi concluído o conjunto de dados coletado com filmadoras. As Tabelas 3.1 e 3.2 resumem as informações sobre os 16 segmentos de rodovias obser-

vados. Na maior parte dos locais, não havia faixas adicionais, sendo que no segmento da SP-255, entre Jaú e Bocaina, a primeira coleta de dados não havia faixa adicional, enquanto que, durante a coleta para a validação, a faixa adicional havia sido construída.

A maior parte dos segmentos possui um relevo ondulado, típico do interior do Estado de São Paulo. Em locais onde existem rampas longas e íngremes, como é o caso da SP-255 (do km 139 ao km 145; e do km 162,2 ao km 168,5), as porcentagens de veículos em pelotões tiveram valores médios próximos de 30% mesmo com o fluxo baixo e a presença de faixas adicionais. Nos segmentos da SP-98 e da SP-123 a porcentagem de veículos em pelotões também foi elevada, decorrente do alto volume de veículos.

Nos locais estudados, a porcentagem de caminhões variou, principalmente, entre 15% e 35%. As exceções foram a SP-253 (entre o km 151 e o km 155; e o km 161 e o km 168), com valores entre 60% e 75%, devido o segmento ser uma rota de fuga de pedágio usada pelos caminhoneiros; e a SP-308, com valores entre 40% e 55%, devido ser uma estrada usada para escoamento da produção industrial da região de Piracicaba. Outras exceções foram a SP-98 e a SP-123, com uma pequena porcentagem de veículos pesados, geralmente em torno de 3%, em função da grande presença de automóveis e de proibição do tráfego de caminhões nos horários de pico em feriados. No total, foram realizadas 140 horas de filmagens.

Tabela 3.1: Rodovias de pista simples selecionadas para filmagem do tráfego

Rodovia	Trecho	km inicial	km final	Extensão (km)	Segmentos com faixas adicionais?
SP-215	SP-310 - Descalvado	133	138,5	5,5	não
SP-225	Itirapina - Brotas	113	121	8,0	não
SP-225	Brotas - Jaú	133	141	8,0	não
SP-253	SP-255 - Luis Antônio	151	155	4,0	não
SP-322	Bebedouro - Pitangueiras	382,5	388,3	5,8	não
SP-253	SP-255 - Luis Antônio	161	168	7,0	sim
SP-255	Ribeirão Preto - Araraquara	54	60	6,0	sim
SP-255	Jaú - Barra Bonita	162,2	168,5	6,3	sim
SP-318	São Carlos - Ribeirão Preto	262	266	4,0	sim
SP-255	Jaú - Bocaina	139	145	6,0	sim*
SP-98	Bertioga - Mogi das Cruzes	93,8	97,4	3,6	não
SP-123	Taubaté - Campos do Jordão	7,9	13,3	5,4	não
SP-308	Salto-Capivari	102,5	108,0	5,5	não
SP-300	Tietê-Laranjal Paulista	168,5	172,5	4,0	sim
SP-270	Alumínio-Sorocaba	82,0	89,0	6,0	sim
SPA-110/330	Rod. Anhanguera - Paulínia	1,0	2,5	1,5	não

* Não havia faixa adicional na primeira coleta de dados

Tabela 3.2: Dados de tráfego dos 16 segmentos filmados

Data da coleta	Direção (km)	Rodovia	Fluxo mínimo (veic/h)	Fluxo máximo (veic/h)	Caminhões (%)	Pelotões (%)	Velocidade média dos caminhões (km/h)	Velocidade média dos automóveis (km/h)
13/02/2004	133 - 138,5	SP-215	60	110	32%	22%	71	86
	138,5 - 133		80	160	32%	19%	76	100
21/10/2004	133 - 138,5		90	190	30%	23%	76	91
	138,5 - 133		90	160	31%	27%	76	94
21/01/2004	113 - 121	SP-225	90	200	45%	29%	72	87
	121 - 113		40	150	33%	22%	72	90
22/10/2004	113 - 121		120	240	35%	36%	67	81
	121 - 113		100	210	24%	35%	72	85
23/01/2004	133 - 141	SP-225	50	120	32%	17%	84	95
	141 - 133		70	120	24%	22%	65	87
05/11/2004	133 - 141		80	170	46%	19%	79	91
	141 - 133		50	140	36%	22%	63	82
30/01/2004	151 - 155	SP-253	50	170	62%	20%	75	90
	155 - 151		60	160	65%	26%	87	100
03/11/2004	151 - 155		80	230	67%	28%	75	87
	155 - 151		100	240	65%	31%	89	89
12/02/2004	382,5 - 388,3	SP-322	140	210	23%	31%	71	84
	388,3 - 382,5		140	240	25%	31%	76	95
04/11/2004	382,5 - 388,3		120	220	29%	35%	71	87
	388,3 - 382,5		140	230	35%	34%	69	84
28/10/2004	161 - 168	SP-253	100	250	75%	27%	71	80
	168 - 161		140	240	68%	26%	74	82
10/10/2005	161 - 168		80	200	60%	18%	73	86
	168 - 161		100	190	52%	20%	77	88
02/12/2004	54 - 60	SP-255	100	210	36%	23%	70	81
	60 - 54		80	220	28%	15%	76	92
17/10/2005	54 - 60		110	220	26%	23%	72	82
	60 - 54		80	170	23%	16%	72	85
24/11/2005	162,2 - 168,5	SP-255	120	260	23%	31%	59	81
	168,5 - 162,2		150	260	23%	31%	67	79
09/12/2005	162,2 - 168,5		150	220	20%	28%	62	81
	168,5 - 162,2		130	220	32%	30%	65	75
26/11/2004	262 - 266	SP-318	60	170	28%	17%	59	81
	266 - 262		80	150	26%	14%	67	79
21/10/2005	262 - 266		70	180	27%	19%	62	81
	266 - 262		60	160	22%	12%	65	75
29/01/2004	139 - 145	SP-255	160	290	23%	29%	81	91
	145 - 139		160	310	20%	26%	56	73
14/12/2005	139 - 145		210	270	27%	26%	75	85
	145 - 139		190	310	28%	22%	64	87
23/11/2008	93,8 - 97,8	SP-98	870	1350	4%	39%	68	70
	97,8 - 93,8		70	190	3%	78%	64	68
07/12/2008	93,8 - 97,8		1030	1340	4%	59%	72	76
	97,8 - 93,8		70	390	2%	75%	66	69
09/07/2010	5,1 - 10,6	SP-123	800	1310	3%	87%	65	69
	10,6 - 5,1		110	340	23%	57%	68	74
09/07/2010	7,9 - 13,3		1140	1280	3%	95%	63	64
	13,3 - 7,9		160	280	6%	65%	64	71
03/04/2012	102,5-108,0	SP-308	220	360	41%	41%	64	84
	108-102,5		200	390	35%	52%	61	83
04/04/2012	168,5-172,5	SP-300	220	440	23%	47%	74	90
	172,5-168,5		190	380	22%	38%	73	88
11/04/2012	82,0-89,0	SP-270	360	560	18%	53%	60	73
	89,0-82,0		230	410	18%	43%	58	72
vários dias	1,0-2,5	SPA-	650	1360	18%	74%	57	59
	2,5-1,0	110/330	560	1850	17%	76%	59	63

A SPA-110/330, por se tratar de um lugar que tem fluxo alto e que, por vezes, a demanda ultrapassou a capacidade da via, não foram aproveitados alguns dados em regime congestionado (30% do total obtido nesse lugar). A Figura 3.6 ilustra o conjunto de dados coletados com a presença das correntes de tráfego em regime de fluxo congestionado da SPA-110/330.

Figura 3.6: Pontos fluxo-velocidade unidirecionais (a) e bidirecionais (b) obtidos em campo com filmadoras na SPA-110/330 e em outras estradas em regime não congestionado e congestionado

Para separar os dados em regimes diferentes da SPA-110/330, e usar somente aqueles que estiverem em regime de fluxo não congestionado, foi realizado um tratamento das informações por meio de uma análise de *cluster*, um método da estatística multivariada e usado para diferenciar objetos homogêneos em um grupo heterogêneo a partir de um critério baseado nas características dos indivíduos [Hair Jr. *et al.*, 2005; Pitombo e Kawamoto, 2005]. Para aplicação da análise de *cluster*, é necessário: definir o problema e as variáveis para realizar o agrupamento; escolher a medida de similaridade entre os objetos; definir o algoritmo de aglomeração; definir o número de grupos; e interpretar os grupos resultantes [Pitombo e Kawamoto, 2005].

Foi aplicada a análise de *cluster* através do método *k-means*, tendo a distância euclidiana como a medida de similaridade entre os elementos de um grupo, escolhida e aplicada por ser recomendada para situações com grande número de observações. Com a aplicação da análise de *cluster* nos dados da SPA-110/330, foi possível determinar a velocidade na capacidade e, consequentemente, dividir os dados entre congestionado e não congestionado, como mostra a Figura 3.7. A corrente de tráfego somente foi selecionada para compor o conjunto de dados se os fluxos nos dois sentidos tivessem velocidades acima da velocidade na capacidade.

Figura 3.7: Aplicação da análise de cluster para determinar a velocidade na capacidade das correntes de tráfego unidirecionais (a) e bidirecionais (b) da SPA-110/330

Tanto para os fluxos unidirecionais quanto para as correntes de tráfego bidirecionais, a velocidade na capacidade obtida com a aplicação da análise de cluster foi próxima de 50 km/h. A Figura 3.8 mostra todas as correntes de tráfego obtidas em regime de fluxo livre não congestionado.

Figura 3.8: Correntes de tráfego unidirecionais (a) e bidirecionais (b) coletadas em regime não congestionado

Percebeu-se que havia, ainda, mais observações de fluxos baixos do que de fluxos próximos à capacidade. Dessa maneira, foi necessário homogeneizar o conjunto de dados para que houvesse pesos semelhantes durante a calibração e a validação do CORSIM, independente da magnitude do fluxo de tráfego. Embora este trabalho proponha o desenvolvimento de modelos de tráfego unidirecionais – uma tendência em manuais de tráfego como o HCM e o HBS – a seleção de observações das correntes de tráfego para calibração do CORSIM teve que ser rea-

lizada para as correntes de tráfego bidirecionais, visto que os sentidos opostos são interligados e, portanto, não poderiam ser selecionados separadamente.

Foi realizada a homogeneização dos fluxos bidirecionais da seguinte forma: (i) a seleção de correntes de tráfego devia ser feita agrupando-se as correntes de tráfego em classes de fluxos (0 a 100 veic/h, 100 a 200 veic/h, etc); (ii) as correntes de tráfego com fluxos intermediários ou altos – acima de 600 veic/h – não foram desprezadas por serem difíceis de serem obtidas (geralmente, quando uma rodovia de pista simples tem fluxo intermediário, ela é duplicada); e (iii) para não comprometer a homogeneidade dos fluxos unidirecionais, foram considerados os fluxos bidirecionais com divisão direcional próximas de 50/50; para os fluxos maiores do que 600 veic/h, essa restrição não foi imposta para que fluxos elevados não fossem descartados.

Assim, foram selecionadas até 10 correntes de tráfego em cada uma das classes da distribuição de frequência dos fluxos bidirecionais. Em casos em que havia mais do que 10 observações por classe, foram escolhidas correntes de tráfego por meio de Amostragem de Monte Carlo. A Figura 3.9 mostra como ficou a distribuição de frequência dos fluxos bidirecionais após eliminar algumas correntes de tráfego. Em cinco classes, houve mais de 10 correntes de tráfego selecionadas, que não foram excluídas pela dificuldade de serem observadas em rodovias de pista simples.

Figura 3.9: Distribuição de frequência das correntes de tráfego bidirecionais selecionadas

A Figura 3.10 mostra a distribuição de frequência dos fluxos unidirecionais após a seleção de um total de 220 correntes de tráfego. De maneira geral, as classes tiveram frequências seme-

lhantes. Exceções ocorreram devido à presença de fluxos altos com divisão direcional longe de 50/50 e que não puderam ser excluídas da seleção.

Figura 3.10: Distribuição de frequência das correntes de tráfego unidirecionais selecionadas

A Figura 3.11a mostra os 220 pontos fluxo-velocidade das correntes de tráfego selecionadas, sendo metade para calibrar o CORSIM e outra metade para validar o simulador e os modelos de tráfego em capítulos subsequentes. A Figura 3.11b ilustra os fluxos escolhidos em função da sua utilização: (i) para calibração do CORSIM; (ii) usadas para validar o simulador e, também, os modelos de tráfego desenvolvidos nesta pesquisa. Percebe-se, ainda, que a divisão do conjunto de dados em dois proporcionou conjuntos semelhantes, ambos possuindo fluxos baixos, intermediários e próximos da capacidade.

Figura 3.11: Correntes de tráfego bidirecionais selecionadas (a) com metade para calibrar o CORSIM e outra metade para validar o simulador e os modelos de tráfego em capítulos subsequentes (b)

3.2. Dados de tráfego de laços indutivos

No item anterior, foram discutidos os dados obtidos com filmadoras, que possuíam, dentre outras informações, a velocidade média no espaço dos veículos. Nesta pesquisa, também foram obtidos dados de tráfego provenientes de laços indutivos, com informações sobre a velocidade média no tempo, o fluxo e o tipo de veículo, agregados em intervalos de 15 minutos.

Os dados de sensores de tráfego foram usados para: (i) planejar coletas de campo com as filmadoras; e (ii) determinar a velocidade de fluxo livre direcional dos segmentos a serem modelados no CORSIM, quando necessário; e (iii) estimar o *headway* médio mínimo, um dado usado como *input* do simulador. As informações foram disponibilizadas:

- Pela Nascentes das Gerais, concessionária que opera a rodovia MG-050 e um trecho da rodovia BR-256;
- Pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, DER-SP; e
- Por Concessionárias paulistas, por meio do apoio da Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP); os sensores usados são gerenciados pelas concessionárias Intervias, Colinas, Renovias, ViaOeste e Rodovias do Tietê.

Foram analisadas as informações provenientes dos sensores com períodos posteriores a 2008, quando existiam, provenientes de 44 sensores de tráfego (Tabela 3.3). Foram 17 sensores gerenciados pela Concessionária Nascentes das Gerais, quatro pelo DER-SP e 23 pelas concessionárias paulistas.

Os formatos dos arquivos obtidos junto aos órgãos eram diferentes e tiveram que ser compatibilizados. No caso dos dados do DER-SP, da Concessionária Nascentes das Gerais e da Renovias, dois histogramas foram disponibilizados pelo sistema que gerencia os sensores para intervalo de agregação 15 minutos. No primeiro histograma, as velocidades médias, em km/h, são agregadas nas seguintes classes: ≤ 40 , entre 40 e 60, entre 60 e 80, entre 80 e 100, entre 100 e 120, entre 120 e 140 e ≥ 140 .

Para calcular a velocidade média em cada intervalo, foi realizada uma média ponderada dos pontos médios das classes de velocidade, em que os pesos foram o número de observações em cada intervalo. Nesse caso, a classe “ ≥ 140 ” teve como ponto médio da classe o valor

de 140 km/h, o mesmo ocorrendo para a classe “ ≤ 40 ”. Intervalos que tiveram veículos somente na classe “ ≤ 40 ” foram excluídos, pois, além de ser uma classe com o dobro da amplitude da maioria, espera-se que existam mais dados próximos de 40 do que próximo de zero.

Tabela 3.3: Resumo dos dados obtidos de sensores

Órgão gerenciador	Rodovia	Localização do sensor (km)	Período de coleta disponível	
			Inicial	Final
Nascentes das Gerais	MG-050	75	13/03/2008	31/05/2010
	MG-050	82,5	01/01/2008	31/03/2010
	MG-050	91,1	01/01/2008	31/05/2010
	MG-050	104	11/06/2008	25/05/2010
	MG-050	130	10/06/2008	31/05/2010
	MG-050	142,2	01/01/2008	31/05/2010
	MG-050	151,1	10/05/2008	31/05/2010
	MG-050	199	10/05/2008	31/05/2010
	MG-050	217,3	01/01/2008	31/05/2010
	MG-050	272,2	08/03/2008	31/05/2010
	MG-050	316	09/04/2008	31/05/2010
	MG-050	334	14/03/2008	31/05/2010
	MG-050	356	25/05/2008	31/05/2010
	MG-050	361	17/05/2008	12/05/2010
	MG-050	379	09/05/2008	31/05/2010
	MG-050	390	01/01/2008	31/05/2010
	BR-265	649	28/03/2008	31/05/2010
DER-SP	SP-55	211	01/01/2008	21/05/2010
	SP-55	211,3	01/01/2008	03/10/2008
	SP-123	8	01/01/2008	21/05/2010
	SP-55	214	05/02/2010	21/05/2010
Intervias	SP-352	183	12/05/2008	31/08/2010
	SP-215	80,2	01/01/2008	31/08/2010
	SP-215	129,4	01/01/2008	31/08/2010
	SP-191	14,4	14/03/2008	31/08/2010
	SP-191	70,5	12/05/2008	31/08/2010
Colinas	SP-300	128,5	01/01/2008	30/11/2011
	SP-300	139,3	01/01/2008	30/11/2011
	SP-127	70,8	01/01/2008	30/11/2011
	SP-127	98,8	01/01/2008	30/11/2011
Renovias	SP-215	42,6	01/01/2008	31/12/2011
	SP-344	226,2	01/01/2008	31/12/2011
ViaOeste	SP-270	55,5	01/02/2008	31/08/2010
	SP-270	61,5	01/12/2009	31/08/2010
	SP-270	78,2	01/01/2008	31/08/2010
	SP-270	89	01/11/2008	31/08/2010
Rodovias do Tietê	SP-300	168,9	01/02/2011	30/09/2011
	SP-300	186,7	01/02/2011	30/09/2011
	SP-300	241	01/02/2011	30/09/2011
	SP-101	35,1	01/02/2011	30/09/2011
	SP-101	49,2	01/02/2011	30/09/2011
	SP-101	69,5	01/02/2011	30/09/2011
	SP-308	103,5	01/02/2011	30/09/2011
	SP-113	11,8	01/02/2011	30/09/2011

O segundo histograma apresentava a distribuição dos tipos de veículos, classificados de acordo com o comprimento: moto (até 2,5 metros), automóvel (entre 2,5 e 7,5 metros), caminhões até 13 metros e caminhões com comprimento acima de 13 metros. Nesta pesquisa, as motos foram desconsideradas, principalmente por não ser possível simulá-las.

No caso dos dados fornecidos pelas concessionárias Colinas, Rodovias do Tietê, ViaOeste e Intervias, foram disponibilizados, para cada intervalo, informações sobre a porcentagem de automóveis e caminhões, além da velocidade média. Ao contrário do formato comentado anteriormente, os dados não são apresentados em forma de histograma. Foi realizada uma compatibilização para que as informações fossem armazenadas em um banco de dados com formato único, sendo possível obter valores para o fluxo de tráfego, a velocidade média e a porcentagem de veículos pesados direcionais e bidirecionais.

O planejamento das filmagens baseou-se nos dados dos sensores e consistiu, principalmente, em avaliar qual período do ano havia uma maior chance de ocorrer fluxos com magnitudes desejadas (intermediários e altos). Essa análise permitiu determinar a coleta de dados na SP-123, na SP-300, na SP-308 e na SP-270, como mostra o exemplo da Figura 3.12.

Figura 3.12: Série histórica dos volumes de tráfego no sensor do km 89, SP-270, em abril de 2010

Para ajudar nas estimativas das velocidades de fluxo livre unidirecionais que seriam informadas na modelagem dos segmentos, é necessário avaliar a velocidade média de tráfego quando o fluxo é baixo. Em alguns casos, o volume de tráfego observado pelas filmagens não

foi baixo, tendo sido observados volumes intermediários e até próximos à capacidade. Sendo assim, uma alternativa seria estudar os fluxos coletados por sensores de tráfego presentes nos segmentos filmados. Detalhes sobre a modelagem dos segmentos no CORSIM pode ser visto no capítulo a seguir.

Para determinar a capacidade unidirecional, que representa um dos objetivos específicos desta tese, foram utilizados dados de tráfego gerados por simulação (ver Capítulo 7). No entanto, um dos dados de entrada do CORSIM é o *headway mínimo para inserção de veículos na corrente de tráfego* (*Entry 2, Record Type 70* do simulador). Somente seria possível obter essa informação avaliando-se segmentos onde fosse observada a capacidade unidirecional. Somente foram encontrados dados na capacidade, provenientes dos sensores de tráfego, na SP-55 (km 211; 211,3; e 214) e na SP-123, km 8. Esses quatro segmentos tinham uma característica semelhante: eram localizados em segmentos planos e retos. Esses segmentos são gerenciados pelo DER-SP e apresentam alta demanda durante feriados e período de férias (Bertioga e Campos do Jordão).

Assim como ocorreu com os dados da SPA-110/330 (Figura 3.7), os dados dos quatro sensores tiveram que ser tratados para separar as informações em regime de fluxo congestionado e não congestionado por meio de uma análise de *cluster*. Para que o agrupamento pudesse ser realizado, apenas foram escolhidos os pontos mais próximos à capacidade (maiores do que 1500 veic/h), com a velocidade média sendo a medida de similaridade. A Figura 3.13 mostra a aplicação da análise de *cluster* para separar os dois regimes de fluxo do sensor da SP-55, km 214, em um dos sentidos do tráfego no ano de 2010. A mesma aplicação foi desenvolvida para os dados dos outros três sensores.

Figura 3.13: Pontos fluxo-velocidade da SP-55, km 214, durante a aplicação da análise de *cluster* em um dos sentidos (a) e após a aplicação (b)

3.3. Dados obtidos com GPS

Neste trabalho, o CORSIM foi calibrado em duas etapas: (i) para ajuste dos parâmetros do modelo de desempenho (*Record Type* 173 do simulador); e (ii) para calibrar as lógicas de *car-following*, de ultrapassagens e de velocidades desejadas. Em cada caso, foi conduzido um experimento distinto (Capítulo 4).

Os parâmetros ajustáveis do modelo de desempenho estão armazenados no RT173 do CORSIM, que contém valores de acelerações máximas para velocidades variando de 0 ft/s a 110 ft/s (0 a 120 km/h), segundo uma função decrescente. Para calibrá-los, foram coletadas informações numa rodovia de pista dupla, a Via Washington Luís (SP-310, km 200) em 2011, na qual, em um posto de pesagem, foram obtidos dados da massa e da potência dos caminhões. Além disso, foi instalado um GPS diferencial em alguns caminhões para determinar o perfil de velocidade ao longo de um segmento de 11 km da SP-310, a intervalos de 1,0 s.

No total, 35 caminhões tiveram seus perfis de velocidade obtidos com o GPS. Na maior parte das vezes, os veículos percorreram todo o segmento de 11 km, mas, em alguns casos, os veículos acessavam um trevo intermediário, o que fazia o segmento percorrido ser menor (cerca de 6 km). Os perfis de velocidade foram, depois, desagregados em acíves específicos para facilitar a calibração do modelo de desempenho.

A Tabela 3.4 mostra os tipos de caminhões coletados em campo em função da categoria e das inclinações das rampas ascendentes. Foram definidas quatro categorias para os caminhões em função, principalmente, do número de eixos: leves (caminhões rígidos com dois eixos); médios (rígidos com três eixos); pesados (articulados com cinco ou seis eixos); extrapesados (articulados com sete ou nove eixos) [Cunha *et al.*, 2005]. A organização dos veículos em categorias deve-se ao fato do CORSIM somente conseguir simular quatro categorias de caminhões.

Tabela 3.4: Amostra de caminhões obtida para calibrar o modelo de desempenho do CORSIM				
Rampas	Categoria dos caminhões			
	Leves	Médios	Pesados	Extrapesados
2,0%	32	44	39	13
2,5%	5	11	10	2
3,5%	8	11	10	4
6,0%	8	11	10	4
Total	53	77	69	23

A equipe de coleta dos perfis de velocidades envolvia dois pesquisadores que embarcavam nos veículos, separadamente, e outro que os acompanhava com um automóvel para trazê-los

de volta ao ponto de partida (balança). Outro pesquisador permanecia na balança para registrar o peso, o tipo e a marca dos veículos. Depois, por meio de catálogos especializados, era determinada a potência nominal.

Obviamente, um número muito maior de veículos foi registrado na pesquisa realizada junto à balança. Assim, foi necessário avaliar se os veículos que tiveram o GPS instalado pertenciam à mesma população dos caminhões registrados na balança. A Figura 3.14 mostra os resultados dessa análise para as quatro categorias veiculares, que indicaram pertencer à mesma população. Essa figura mostra uma preocupação durante a coleta de dados: obter veículos com relações massa/potência heterogêneas dentro da população. A aplicação desses dados para ajustar os parâmetros no RT173 do CORSIM pode ser vista no capítulo a seguir.

Figura 3.14: Relações massa/potência dos veículos com perfil de velocidade *versus* a população de caminhões observados na balança, de acordo com a categoria: leves (a), médios (b), pesados (c) e extrapesados (d)

O uso do aparelho de GPS permitiu, ainda, determinar as zonas de ultrapassagens e das faixas adicionais, obtidas a partir de vistorias realizadas em todas as rodovias estudadas. Foram feitas marcações de pontos de interesse com um GPS a partir da localização do veículo a cada segundo. Uma dessas marcações foram o início e o final das zonas de ultrapassagens em quatro condições num determinado sentido de tráfego: (i) proibição de ultrapassagens em ambos os sentidos; (ii) permissão de ultrapassagens nos dois sentidos; (iii) permissão no sentido e proibição para o fluxo oposto; e (iv) proibição no sentido do tráfego e permissão para o fluxo oposto. De maneira semelhante, também foram obtidos o início e o final das faixas adicionais, em cada sentido de tráfego, e determinada sua declividade.

Os dados do GPS também permitiram estimar as curvas verticais dos segmentos filmados e no entorno dos locais onde haviam sensores de tráfego. Primeiramente, a partir dos dados de latitude e longitude de cada ponto, foram estimados os valores da altitude baseados num modelo digital do programa SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), da agência espacial americana (NASA). Os dados da NASA são acessados por meio da ferramenta *GPS Visualizer* [Schneider, 2010]. Usando média móvel, foram suavizados os valores da declividade e foram obtidos segmentos com declividades semelhantes, conforme mostra a Figura 3.15.

Figura 3.15: Exemplo de perfil vertical estimado a partir de dados de GPS (SP-123)

Andrade [2012] detalha mais a utilização de GPS para coletar as coordenadas em planta e os valores da altitude da estrada. O CORSIM somente permite declividades com números inteiros, e isso foi levado em consideração quando foram definidas as rampas equivalentes. Dessa maneira, as rampas foram arredondadas para o inteiro mais próximo.

No CORSIM, somente são permitidas a modelagem de curvas horizontais circulares, não podendo existir curvas horizontais de transição. Para estimar as curvas circulares, foram determinados os pontos inicial e final de cada curva. Com o auxílio das imagens aéreas do *Google Earth* e colocando-as numa ferramenta como o *AutoCAD*, foram traçadas duas linhas tangentes a cada curva e foi medida o seu ângulo central, como mostra a Figura 3.16. Assim, foi possível obter o raio através da seguinte fórmula:

$$R = \frac{D \cdot 180}{\pi \cdot AC}, \quad (3.1)$$

em que: R : Raio da curva(m);

D : Desenvolvimento da curva (m); e

AC : Ângulo central (grau)

Figura 3.16: Definição do ângulo central para estimar o raio de uma curva circular (SP-270)

4. Calibração e validação do CORSIM

Apesar do notável interesse de outros simuladores passarem a modelar rodovias de pista simples, como mostra o trabalho de Llorca *et al.* [2014] para o AIMSUN, existem dois simuladores que poderiam ser usados para conduzir os experimentos desta pesquisa: o TWOPAS – disponibilizado gratuitamente pela *Federal Highway Administration* (FHWA) – e o CORSIM – adquirido junto à *McTrans*, centro de pesquisa que é parte da *University of Florida Transportation Institute* (UFTI). Na literatura, é possível identificar outros softwares capazes de simular rodovias de pista simples, tais como:

- VTISIM (*VTI Traffic Simulation Model*): simulador sueco desenvolvido pela VTI – *Swedish National Road and Transport Research Institute* [Brodin e Carlsson, 1986];
- RUTSIM (*Rural Traffic Simulator*): modelo sueco baseado no VTISIM [Tapani, 2008];
- LASI: simulador alemão usado na determinação dos procedimentos do HBS2001 [Brilon e Weiser, 2006]; e
- HUTSIM: software finlandês desenvolvido pelo *Laboratory of Transportation Engineering* da *Helsinki University of Technology* [TKK, 2011].

No entanto, esses simuladores não podem ser disponibilizados para o público em geral, gratuitamente ou não. Sendo assim, foi realizado um estudo para definir qual simulador, entre o TWOPAS e o CORSIM, seria mais indicado para desenvolver as simulações necessárias desta pesquisa. Os resultados dessa análise foram apresentados em Bessa Jr. e Setti [2011b] e apontaram o CORSIM como mais adequado do que o TWOPAS, e os motivos que levaram a essa conclusão foram:

- Documentação mais abrangente, tanto do ponto de vista da disponibilidade de relatórios técnicos quanto de manuais para a correta utilização do software;
- Suporte técnico para solução de dúvidas e sobre as rotinas do simulador;

- Possibilidade de modelagem de situações efetivamente ocorridas em campo, como a utilização de locais proibidos para finalizar manobras de ultrapassagens e a possibilidade de modelar interseções e segmentos com diversos tipos de estradas;
- Maior número de dados de entrada; alguns são parâmetros que, uma vez calibrados, podem representar o comportamento do motorista/veículo de maneira mais realista;
- Atualização das simulações a cada 0,1 s (no TWOPAS, é a cada 1 s), que pode fornecer uma maior precisão nos resultados das simulações; e
- Maior quantidade de dados de saída e obtenção de dados por veículo, condições fundamentais para estudar medidas de desempenho da qualidade de serviço de rodovias.

Escolhido o CORSIM para conduzir os experimentos de simulação, foi necessário estudar os seus submodelos visando calibrar seus diversos parâmetros de entrada, procurando-se parâmetros que representem bem, em média, todos os trechos observados. Muitos desses parâmetros são difíceis de serem observados diretamente em campo, ou porque são complicados de isolar, ou devido à necessidade de coletar muitos dados [Hollander e Liu, 2008]. Os simuladores (como o CORSIM) são fornecidos com valores *default* para os parâmetros de seus submodelos, que representam, basicamente, o tráfego do local onde o modelo foi desenvolvido.

Em razão disso, para garantir que o simulador represente o sistema real com uma fidelidade adequada, de modo que as diferenças entre os resultados da simulação e os resultados observados em campo (representadas por uma função *fitness*) sejam minimizadas, é necessário ajustar seus parâmetros, o que significa calibrar o simulador [Hellings, 1998; Egami *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2005]. Nesta parte deste trabalho, são apresentadas as informações acerca da calibração e da validação desenvolvidas para o CORSIM, como as suposições feitas para a modelagem dos segmentos de rodovias observados em campo, além de apresentar e discutir os parâmetros de calibração mais importantes para esta pesquisa.

4.1. Calibração de simuladores de tráfego com algoritmos genéticos

Calibrar parâmetros de um simulador pode ser considerado um problema de otimização. Um conjunto de parâmetros deve ser determinado para maximizar – ou minimizar – uma função *fitness*, formulada pelos dados de tráfego observados (como velocidade, volume e tempo de

viagem) e pelos resultados da simulação [Kim e Rilett, 2001; Ma *et al.*, 2007]. As abordagens tradicionais de calibração de simuladores de tráfego têm dado bons resultados, porém tendem a fornecer ótimos locais [Ma e Abdulhai, 2002]. Uma ferramenta de otimização que tem a potencialidade de eliminar tal problema é o Algoritmo Genético (AG).

O AG é um procedimento iterativo baseado na teoria da evolução. O processo do AG consiste, inicialmente, da produção aleatória de uma população, ou seja, um conjunto de cromossomos (indivíduos) que são soluções para o problema e cujas partes são compostas pelos parâmetros do simulador que se deseja calibrar. Durante cada iteração, que representa uma nova geração de descendentes da população inicial, os indivíduos são avaliados e selecionados segundo seu grau de adaptação ao meio ambiente – a qualidade da solução que fornecem, medida através de uma função *fitness*. Isso faz com que os indivíduos mais bem adaptados transmitam as suas características ao longo das gerações, enquanto que os menos adaptados tendem a desaparecer [Goldberg, 1989].

No AG, operadores genéticos, como o *crossover*, a *seleção*, a *mutação* e a *predação*, são usados para formar uma nova geração de descendentes. O operador *crossover* produz um novo indivíduo a partir de partes específicas de outros dois indivíduos (pais) selecionados da população. Um desses processos de seleção, chamado de elitismo, consiste em escolher o melhor indivíduo para se reproduzir com outros da população. A mutação serve para introduzir variação na solução e, conseqüentemente, aumentar a probabilidade de se atingir um ótimo global [Goldberg, 1989; Tomassini, 1995].

O *crossover* garante que as características dos melhores indivíduos sejam transmitidas para gerações futuras, fazendo os cromossomos ficarem semelhantes e próximos a um ótimo local. A mutação serve para introduzir a diversidade genética necessária para que as gerações seguintes continuem evoluindo, ao substituir algumas partes dos cromossomos (genes) por novos valores escolhidos aleatoriamente. As mutações benéficas (que melhoram a solução) persistem, enquanto que as deletérias tendem a desaparecer [Goldberg, 1989].

A predação não apenas serve para eliminar as piores soluções (indivíduos menos adaptados), como também insere diversidade genética na população, ao repor os indivíduos predados por novos indivíduos. Há dois tipos de predação: por síntese e randômica. A predação por síntese faz com que determinados cromossomos tenham seus genes substituídos pelos resultados mais comuns encontrados na população. A predação randômica elimina uma determinada

quantidade de indivíduos com os piores valores de fitness, substituindo-os por outros gerados randomicamente [Crocomo *et al.*, 2004].

Para uma evolução eficiente da população, os operadores genéticos que inserem diversidade na população (mutação e predação) devem ser aplicados em gerações intermitentes, e não em toda iteração. Isso é feito para que essa diversidade seja “absorvida” em gerações seguintes com a utilização do crossover, que é aplicado toda vez que uma nova geração é criada. A inserção dessa diversidade aumenta a chance das soluções atingirem um ótimo global. Neste trabalho, foram adotados todos os operadores genéticos, com exceção da predação por síntese.

Na literatura, é possível encontrar vários trabalhos que aplicaram AG para calibrar parâmetros de simuladores de tráfego. Em todas essas pesquisas, foram coletados dados de campo para comparação com resultados gerados pelo simulador, que, em geral, foram melhores do que se fossem utilizados parâmetros *default*. Como exemplo, é possível citar a calibração do TRARR [Egami *et al.*, 2006], do Paramics [Ma e Abdulhai, 2002; Ma *et al.*, 2007], do VISSIM [Park e Qi, 2005; Medeiros *et al.*, 2013], do TWOPAS [Mon-Ma, 2008; Bessa Jr e Setti, 2011a] e do Integration [Bessa Jr. *et al.*, 2008].

No caso do CORSIM, duas calibrações foram realizadas com dados coletados em rodovias brasileiras em pesquisas anteriores [Cunha e Setti, 2006; Araújo, 2007]. Nesses trabalhos, desenvolvidos concomitantemente, foram ajustados os parâmetros para os modelos de desempenho, da lógica de ultrapassagens e da lógica de *car-following*. No entanto, as informações do tráfego foram originadas de rodovias de pista dupla. Como esta pesquisa trata de rodovias de pista simples, faz-se necessário realizar a calibração do CORSIM novamente, especialmente devido terem sido implementados modelos específicos para esse tipo de estrada no simulador bem depois que os demais. Apesar disso, esses dois trabalhos serviram de base para o AG desenvolvido, como é apresentado no item a seguir.

4.2. AG usado na calibração do CORSIM

O CORSIM foi calibrado em duas etapas distintas para ajuste: (i) das lógicas de *car-following*, de ultrapassagens e de velocidades desejadas; e (ii) dos parâmetros do modelo de desempenho. Para cada caso, foi conduzido um experimento distinto. No entanto, o procedimento do AG, de maneira geral, foi semelhante, com exceção de algumas peculiaridades (como a formação do *fitness*). O AG foi implementado em Lua [Ierusalimschy, 2006] e o seu funcionamento segue o fluxograma apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1: Fluxograma do programa utilizado na calibração automática do CORSIM

O programa usado é composto por três módulos: de controle, de simulação e do AG. O módulo de controle contém rotinas para desenvolvimento de uma das principais vantagens do AG: a automatização do processo de calibração, que se inicia com a criação da primeira população de cromossomos, realizada randomicamente. Cada um desses indivíduos representa um conjunto de parâmetros do CORSIM a ser inserido no arquivo de entrada de cada uma das correntes de tráfego selecionadas para serem executadas (acionamento do módulo de simulação). O tempo de simulação adotado de cada corrente de tráfego foi de 15 minutos e o tempo de *warm-up* de até 15 minutos. Para aumentar a confiabilidade da calibração, as correntes de tráfego (total igual a 110, conforme apresentado no capítulo anterior) foram replicadas cinco vezes para diferentes conjuntos de sementes de números aleatórios.

Cada um dos indivíduos (cromossomos) representa um conjunto de parâmetros do CORSIM a ser inserido no arquivo de entrada. A população inicial (de 40 indivíduos) é totalmente avaliada, buscando-se estabelecer qual é o *fitness* do melhor indivíduo da população. Após o término de cada geração, deve-se avaliar se o critério de parada (número máximo de gerações igual a 150) foi atingido.

Caso não, o módulo do AG é executado, com aplicação da seleção (elitismo) e do *crossover*, de modo que o melhor indivíduo de cada geração seja escolhido para que seus genes possam substituir alguns dos genes de cada cromossomo da população por meio de uma *máscara aleatória*. A *máscara aleatória* determina, para cada *crossover*, uma *string* binária do tamanho do cromossomo (igual ao número de parâmetros a serem calibrados). Assim, quando um bit for representado pelo algarismo “1”, o gene correspondente à posição do bit do *n*-

ésimo indivíduo da população será substituído pelo gene da mesma posição do melhor indivíduo selecionado. Caso o bit tenha valor “0”, não haverá troca de genes na posição do bit da *máscara aleatória*. A Figura 4.2 mostra um exemplo para um cromossomo representado com números binários.

Figura 4.2: Exemplo de crossover feito a partir de máscara aleatória

Após a seleção e o crossover, é verificado se será inserida diversidade (mutação e predação) na nova população, o que é realizado a cada duas gerações. As taxas de mutação e de predação são, respectivamente, iguais a 30% e 20%. Quando o critério de parada é atingido, obtém-se a população final, que fornece os valores dos parâmetros de calibração que produzem a menor diferença entre o fluxo observado na rodovia e o simulado pelo CORSIM.

O AG foi aplicado em duas etapas: para calibração dos modelos comportamentais e para ajuste do modelo de desempenho do CORSIM, como mostrado a seguir.

4.3. Calibração dos modelos comportamentais do CORSIM

A calibração dos modelos comportamentais do CORSIM foi iniciada com a modelagem das redes de tráfego. Para isso, foram necessários dados: (i) da velocidade de fluxo livre direcional (FFS_d); (ii) das zonas de ultrapassagens; (iii) das faixas adicionais; (iv) das curvas verticais; (v) das curvas circulares; e (vi) sobre os fluxos veiculares. A obtenção dessas informações foi apresentada no capítulo anterior, com exceção dos dados sobre a FFS_d .

Para estimação da FFS_d , foram usados os dados obtidos com filmadoras. A FFS_d consiste na velocidade média de percurso dos automóveis em intervalos nos quais o fluxo de tráfego bidirecional é menor ou igual a 200 veic/h. Caso não tenham sido obtidos fluxos bidirecionais com essa magnitude para um segmento com as filmagens, foram utilizados os dados provenientes dos sensores de tráfego. Nesse caso, a FFS_d foi estimada como a média das velocidades médias dos veículos quando o fluxo de tráfego bidirecional é menor ou igual a 100 veic/h e a porcentagem de veículos pesados é menor ou igual a 3%.

4.3.1. Função fitness

O *fitness*, ou função objetivo, é uma parte essencial do processo de calibração porque, buscando-se maximizá-la (ou minimizá-la, se for o caso), o algoritmo vai tentar manter as melhores soluções e eliminar as piores. Hollander e Liu [2008] apresentaram uma síntese dos principais tipos de *fitness* encontrados na literatura, e alguns dos principais podem ser vistos na Tabela 4.1, sendo, no caso da calibração de simuladores de tráfego, a variável x como a medida de desempenho simulada, a y como a medida de desempenho observada e N o número total de correntes de tráfego usadas para ajustar os parâmetros.

Tabela 4.1: Exemplos de funções *fitness* encontradas na literatura [Hollander e Liu, 2008]

Nome	<i>Fitness</i>	Comentários
Erro percentual (<i>PE</i>)	$\frac{x_i - y_i}{y_i}$	Aplicado ou para um único par de medidas de desempenho observadas e simuladas ou para medidas de desempenho agregadas para toda a rede
Erro quadrático (<i>SE</i>)	$\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2$	Penaliza erros grandes
Erro médio (<i>ME</i>)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)$	Indica a existência de um viés sistemático. É útil quando aplicado separadamente para medidas de desempenho de cada local
Erro normalizado médio (<i>MNE</i>)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i - y_i}{y_i}$	Indica a existência de um viés sistemático. É útil quando aplicado separadamente para medidas de desempenho de cada local
Erro absoluto médio (<i>MAE</i>)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - y_i $	Não penaliza erros grandes
Erro normalizado absoluto médio (<i>MANE</i>)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ x_i - y_i }{y_i}$	Não penaliza erros grandes
Erro normalizado absoluto médio exponencial (<i>EMANE</i>)	$A \cdot \exp(-B \cdot MANE)$ A e B são parâmetros	Usado como <i>fitness</i> na aplicação de um AG
Raiz do erro quadrático médio (<i>RMSE</i>)	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$	Erros grandes são intensamente penalizados. Às vezes, aparece como erro quadrático médio, sem o sinal de raiz
Raiz do erro normalizado quadrático médio (<i>RMSNE</i>)	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2}$	Erros grandes são intensamente penalizados
Estatística <i>GEH</i>	$\sqrt{\frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}}$	$GEH < 5$ indica um bom resultado
Coefficiente de correlação (r)	$\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$	Reflete as medidas de tendência central e de dispersão. Indica proporcionalidade, nem sempre indica igualdade
Estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov	$\max(F_x - F_y)$	F é uma distribuição de frequência relativa acumulada das variáveis x ou y

Alguns comentários sobre as funções *fitness*, cujas siglas são definidas na Tabela 4.1, são [Hollander e Liu, 2008]:

- A maior parte das funções *fitness* reflete a tendência central entre as medidas de desempenho observadas e simuladas;
- Algumas funções *fitness* (*PE*, *ME*, *MNE*) permitem valores positivos ou negativos e permitem descobrir um viés sistemático (exemplo: os valores calibrados são, geralmente, menores do que os valores observados); e
- Outras funções *fitness* (*MAE*, *MANE*) usam valores absolutos entre as medidas de desempenho observadas e simuladas e, dessa forma, os erros possuem o mesmo peso; funções *fitness* baseadas em diferenças quadráticas (*SE*, *RMSE*, *RMSNE*) fazem com que os erros maiores sejam mais penalizados.

O coeficiente de correlação r é uma das poucas funções *fitness* que usa medidas de tendência central (como a média) e de dispersão (como o desvio padrão) na sua composição. No CORSIM, são fornecidos, como *output*, os histogramas das velocidades médias de viagem e dos *headways* entre os veículos em um determinado ponto de uma rodovia. Usar essas distribuições, que vem no arquivo de saída *.OUT do simulador, para compor uma função *fitness* significa ter uma calibração mais rápida. Por outro lado, usar medidas de desempenho que não estão presentes nos arquivos de saída exigiria calculá-las, por exemplo, a partir do arquivo binário *.TS0, arquivo que fornece os resultados dos veículos individualmente, o que tornaria a calibração lenta.

Sendo assim, foi escolhida uma função *fitness* que consiste na média dos coeficientes de correlação entre as frequências dos histogramas dos dados de campo e simulados com o CORSIM. Para cada corrente de tráfego (fluxo bidirecional em intervalo de 15 minutos), foi possível obter os histogramas das velocidades médias de viagem (um para cada sentido de tráfego) e dos *headways* (um em cada ponto de observação com a filmadora), sendo calculada a função *fitness* de uma determinada solução do AG:

$$F(I) = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\sum_{k=1}^P (H_{SIM} - \bar{H}_{SIM}) \cdot (H_{OBS} - \bar{H}_{OBS})}{\sqrt{\sum_{k=1}^P (H_{SIM} - \bar{H}_{SIM})^2 \cdot \sum_{k=1}^P (H_{OBS} - \bar{H}_{OBS})^2}}, \quad (4.1)$$

em que $F(I)$: valor da função fitness do cromossomo I ;
 M : número total de segmentos estudados;
 N : total de histogramas calculados para cada corrente de tráfego;
 P : total de classes de cada histograma;
 H_{SIM} e H_{OBS} : frequência de uma classe k do histograma de uma medida de desempenho j de uma corrente de tráfego i simulada e observada, respectivamente;
 $\bar{H}_{SIM}$ e $\bar{H}_{OBS}$: média das frequências das k classes do histograma de uma medida de desempenho j de uma corrente de tráfego i simulada e observada, respectivamente;

Na aplicação realizada neste trabalho, a função *fitness* varia entre 0 (nenhuma correlação) e 1 (correlação perfeita) na comparação entre os dados simulados e observados.

4.3.2. Parâmetros de calibração

O AG foi aplicado para calibrar a lógica de *car-following*, o modelo de ultrapassagens e o de velocidades desejadas (no CORSIM, chamado de velocidades de fluxo livre desejadas). A escolha dos parâmetros de calibração desses modelos foi realizada com base nas recomendações de Hollander e Liu [2008], priorizando os que afetassem mais significativamente os dados de saída dos segmentos observados (análise de sensibilidade). A Tabela 4.2 mostra os intervalos de busca dos parâmetros dos submodelos do simulador escolhidos para calibração.

Os primeiros parâmetros apresentados na Tabela 4.2 são os fatores de sensibilidade para a lógica de *car-following* para os dez tipos de motoristas usados pelo CORSIM. Quanto menor o valor desses parâmetros, mais agressivo é o motorista. O CORSIM atribui um tipo de motorista para cada veículo que é inserido na rede. Esse parâmetro, juntamente com o parâmetro P_{11} , é usado no modelo de Pitt, adotado pelo CORSIM para representar a lógica de *car-following* (Equação 4.3) [Schultz e Rillet, 2004; Cunha, 2007].

$$H = L + P_i \cdot v_t + P_{11} + b \cdot P_i \cdot (\mu_t - v_t)^2, \quad (4.2)$$

em que H : distância entre para-choques dianteiros (ft);
 L : comprimento do veículo líder (ft);
 P_i : fator de sensibilidade de *car-following* para a classe de motorista $i = 1, \dots, 10$;
 P_{11} : constante de Pitt (ft);
 μ_t : velocidade do veículo líder no instante t (ft/s);

v_t : velocidade do veículo seguidor no instante t (ft/s); e

b : constante (0,1 se $\mu_t < v_t$ ou 0 se $\mu_t \geq v_t$).

Tabela 4.2: Intervalo de busca e valores *default* dos parâmetros de calibração do CORSIM

Parâmetro	Definição	Record Type (RT)	Unidade	Intervalo de busca
P1	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 1)	68	1 / 100 s	$115 \leq P1 \leq 135$
P2	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 2)	68	1 / 100 s	$105 \leq P2 \leq 125$
P3	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 3)	68	1 / 100 s	$95 \leq P3 \leq 115$
P4	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 4)	68	1 / 100 s	$85 \leq P4 \leq 105$
P5	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 5)	68	1 / 100 s	$75 \leq P5 \leq 95$
P6	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 6)	68	1 / 100 s	$65 \leq P6 \leq 85$
P7	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 7)	68	1 / 100 s	$55 \leq P7 \leq 75$
P8	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 8)	68	1 / 100 s	$45 \leq P8 \leq 65$
P9	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 9)	68	1 / 100 s	$35 \leq P9 \leq 55$
P10	Fator de sensibilidade para a lógica de <i>car-following</i> (motorista 10)	68	1 / 100 s	$25 \leq P10 \leq 45$
P11	Constante de Pitt para a lógica de <i>car-following</i>	68	ft	$3 \leq P11 \leq 10$
P12	Tempo para completar uma mudança de faixa	70	1 / 10 s	$10 \leq P12 \leq 60$
P13	Desaceleração máxima do veículo líder percebida pelo veículo seguidor	70	ft/s ²	$5 \leq P13 \leq 20$
P14-P23	Porcentagem da velocidade de fluxo livre desejada média (motoristas 1-10, P14 a P23)	147	%	$50 \leq P14-P23 \leq 150$
P24	Mínima distância entre o veículo ultrapassando e o veículo que foi ultrapassado quando completada a manobra	155	ft	$25 \leq P24 \leq 100$
P25	Diferença entre a velocidade de um veículo realizando uma ultrapassagem e a velocidade do veículo sendo ultrapassado	155	mi/h	$5 \leq P25 \leq 20$
P26	Valor de impaciência, quando há desejo por ultrapassagem, mas não é possível; afeta o cálculo do desejo por ultrapassagens	155	-	$1 \leq P26 \leq 30$
P27-P30	Aceleração usada por um veículo realizando uma ultrapassagem que está ou com velocidade menor ou igual a 64 km/h (40 mi/h), P27; ou com velocidade entre 64 km/h (40 mi/h) e 81 km/h (50 mi/h), P28; ou com velocidade entre 81 km/h (50 mi/h) e 97 km/h (60 mi/h), P29; ou com velocidade maior ou igual a 97 km/h (60 mi/h), P30	156	(ft/s ²) / 100	$120 \leq P27-P30 \leq 170$
P31-P34	Tempo necessário para um veículo realizar uma ultrapassagem e que está ou com velocidade menor ou igual a 64 km/h, P31; ou com velocidade entre 64 km/h e 81 km/h, P32; ou com velocidade entre 81 km/h e 97 km/h, P33; ou com velocidade maior ou igual a 97 km/h, P34	156	s / 100	$300 \leq P31-P34 \leq 500$
P35-P38	Tempo que um motorista espera permanecer na faixa oposta em uma ultrapassagem e que está ou com velocidade menor ou igual a 64 km/h, P35; ou com velocidade entre 64 km/h e 81 km/h, P36; ou com velocidade entre 81 km/h e 97 km/h, P37; ou com velocidade maior ou igual a 97 km/h, P38	156	s / 100	$500 \leq P35-P38 \leq 1500$
P39-P42	Espaço entre um veículo na faixa oposta e outro que deseja finalizar uma ultrapassagem e que está ou com velocidade menor ou igual a 64 km/h, P39; ou com velocidade entre 64 km/h e 81 km/h, P40; ou com velocidade entre 81 km/h e 97 km/h, P41; ou com velocidade maior ou igual a 97 km/h, P42	156	ft	$50 \leq P39-P42 \leq 350$

Quando a distância H entre o líder e o seguidor fica abaixo de um valor considerado seguro, o veículo seguidor desacelera (aceleração negativa) visando evitar uma colisão, diminuindo a velocidade para que a distância para o veículo líder volte a ser segura. A aceleração é calculada pelo modelo:

$$a = \frac{2 \cdot [x - y - L - P_{11} - u \cdot (P_i + \Delta t) - b \cdot P_i \cdot \Delta u^2]}{\Delta t^2 + 2 \cdot P_i \cdot \Delta t}, \quad (4.3)$$

em que a : aceleração do veículo seguidor (ft/s²);

x : posição do veículo líder no instante $t + T$ (ft);

y : posição do veículo seguidor no instante t (ft);

Δt : incremento de tempo (1 s); e

Δu : diferença entre a velocidade do veículo líder no instante $t + T$ e a velocidade do veículo seguidor no instante t (ft/s).

Esse modelo pode ser substituído por uma desaceleração emergencial, quando necessário [Hajati *et al.*, 1997].

O modelo de desempenho do CORSIM é baseado em relações entre velocidade e aceleração para cada tipo veículo, e é esse modelo que simula veículos com diferentes velocidades em rampas ascendentes [McTrans, 2010]. Nesse caso, surge, nos veículos com desempenho melhor, o desejo por ultrapassagens.

Para se determinar a necessidade de uma ultrapassagem, o veículo deve estar num pelotão. Nesse caso, o CORSIM considera o *headway* de 3 s recomendado pelo HCM como valor *default*, o que não foi alterado neste trabalho. Além disso, o veículo em pelotão deve possuir uma velocidade pelo menos igual à do líder. Uma vez o veículo em pelotão, rotinas específicas são iniciadas para esse estado.

A primeira delas é baseada na variável *velocidade tolerável*, definida como a velocidade máxima quando o desejo de ultrapassar é igual a 100%, que pode variar entre 80% e 90% da *velocidade desejada*. Deve ser informada uma distribuição de velocidades desejadas, que são porcentagens da velocidade de fluxo livre média. A velocidade desejada determina a agressividade de cada tipo de motorista.

O desejo por ultrapassar (DTP) é fortemente influenciado pela diferença entre as velocidades atual e desejada. Se a velocidade atual é maior do que a desejada, DTP é igual à zero. Se a velocidade atual é menor do que a velocidade tolerável, DTP é igual a 100%. No caso da ve-

locidade atual ter um valor entre a velocidade tolerável e a velocidade desejada, *DTP* é interpolado com base numa função exponencial. O valor de *DTP* também é ajustado em função dos comprimentos dos veículos envolvidos na manobra e com base no “valor de impaciência”. Esse fator é incrementado em 0,001 a cada período de atualização se o valor *DTP* se mantiver maior do que zero e se a ultrapassagem ainda não foi iniciada. A soma desses incrementos representa a variável *tempo gasto esperando ultrapassar (TSWTP)*, que recebe o valor zero quando a ultrapassagem é realizada [Washburn e Li, 2010].

A primeira restrição considerada quando há desejo por ultrapassagens é se o segmento permite esse tipo de manobra. Caso seja possível, o motorista verifica se ele está sendo ultrapassado ou se já existe um número máximo de veículos usando a faixa oposta para ultrapassar, que é de três. Um veículo também é impedido de iniciar uma manobra de ultrapassagem se houver mais de cinco veículos que precisam ser ultrapassados e não há *gaps* suficientemente longos entre esses veículos.

Em seguida, o motorista verifica se há uma distância de visibilidade para ultrapassagem (*PSD*) suficiente. Os valores *default* de *PSD* usados no CORSIM, assim como a distância mínima para ultrapassagens, são calculados de acordo com o modelo da AASHTO [2001]. Por fim, deve-se determinar o tamanho da zona de ultrapassagens permitidas quando *DTP* é maior do que zero e verifica-se se é suficiente para desenvolvimento da manobra [Washburn e Li, 2010].

Se há uma necessidade por ultrapassagem e todas as restrições são atendidas, a manobra deve ser executada em três estágios: (i) inicia-se a manobra na faixa normal ao aumentar a velocidade; (ii) ocupa-se a faixa no sentido oposto, onde o veículo acelera-se até atingir uma velocidade de 20 km/h maior do que o veículo ultrapassado; a distância necessária para ultrapassagem (*DNTCP*) é comparada com a distância para ocorrer uma colisão com o veículo no sentido oposto (*DTC*) para decidir se a manobra é abortada ou não; e (iii) retorna-se à faixa normal seguindo a lógica de mudança de faixa do veículo; nesse momento, o motorista pode considerar ultrapassar mais de um veículo [Washburn e Li, 2010].

Quando há faixas adicionais, a rotina usada é diferente. Nesse caso, os veículos mais lentos devem ocupar a faixa da direita, embora isso nem sempre ocorra, o que é representado no CORSIM. Caso o veículo não esteja em pelotão, ele pode mover-se para a faixa da direita, dependendo da velocidade de fluxo livre, da velocidade corrente e do tipo de veículo. A lógi-

ca de mudança de faixa do CORSIM é usada até o momento da faixa adicional terminar, quando o tipo de interação veicular muda [Washburn e Li, 2010].

4.3.3. Resultados da calibração e da validação

Usando-se os valores *default* fornecidos pelo CORSIM para os parâmetros de calibração, obteve-se um valor para a função *fitness* igual a 0,64. Com a implementação do AG, a melhor solução encontrada proporcionou uma sensível melhora nos resultados, com um valor de *fitness* de 0,80, que é 25% maior se comparado ao modelo que usa valores *default* para os parâmetros de calibração. Quando o melhor resultado da calibração foi aplicado para o conjunto de dados da validação, o *fitness* encontrado foi igual a 0,78, um aumento de 22% no valor do *fitness* em relação ao modelo não calibrado.

Os parâmetros encontrados para o melhor cromossomo do AG podem ser vistos na Tabela 4.3, onde são apresentados de acordo com os índices usados na primeira coluna da Tabela 4.2. Em geral, os valores encontrados com o AG para os parâmetros do modelo de *car-following* mostram que os motoristas brasileiros são ligeiramente mais agressivos do que os motoristas americanos (parâmetros *default* do CORSIM), pois, em média possuem valores menores. Os valores para os parâmetros *P14* a *P23* obtidos com o AG sugerem uma maior dispersão nas velocidades desejadas para rodovias brasileiras.

Tabela 4.3: Valores calibrados e *default* para os submodelos do CORSIM

<i>Car-following</i>			Velocidades desejadas			Ultrapassagens					
Parâmetro	AG	<i>default</i>	Parâmetro	AG	<i>default</i>	Parâmetro	AG	<i>default</i>	Parâmetro	AG	<i>default</i>
<i>P1</i>	119	125	<i>P14</i>	66	88	<i>P12</i>	17	20	<i>P33</i>	362	430
<i>P2</i>	111	115	<i>P15</i>	93	91	<i>P13</i>	11	15	<i>P34</i>	437	450
<i>P3</i>	107	105	<i>P16</i>	95	94	<i>P24</i>	63	75	<i>P35</i>	675	990
<i>P4</i>	93	95	<i>P17</i>	96	97	<i>P25</i>	15	12	<i>P36</i>	685	990
<i>P5</i>	91	85	<i>P18</i>	101	99	<i>P26</i>	16	10	<i>P37</i>	784	990
<i>P6</i>	84	75	<i>P19</i>	103	101	<i>P27</i>	123	140	<i>P38</i>	835	990
<i>P7</i>	60	65	<i>P20</i>	104	103	<i>P28</i>	161	143	<i>P39</i>	66	100
<i>P8</i>	57	55	<i>P21</i>	107	106	<i>P29</i>	162	147	<i>P40</i>	96	180
<i>P9</i>	37	45	<i>P22</i>	110	109	<i>P30</i>	165	150	<i>P41</i>	332	250
<i>P10</i>	36	35	<i>P23</i>	125	112	<i>P31</i>	323	360	<i>P42</i>	324	300
<i>P11</i>	5	3				<i>P32</i>	343	400			

Com relação ao modelo de ultrapassagens, a calibração pelo AG forneceu, em relação aos valores *default*, valores menores do tempo para completar uma mudança de faixa (*P12*), da desaceleração máxima do veículo líder percebida pelo veículo seguidor (*P13*) e da mínima distância entre o veículo que ultrapassa e o veículo que é ultrapassado quando completada a

manobra (*P24*). Por outro lado, foram encontrados valores maiores para a diferença entre a velocidade de um veículo realizando uma ultrapassagem e a velocidade do veículo que é ultrapassado (*P25*) e para o valor de impaciência (*P26*).

A calibração pelo algoritmo genético forneceu, em geral, maiores acelerações para os veículos que realizam uma ultrapassagem (*P27* a *P30*), e menores valores para o tempo que um motorista aceita permanecer na faixa oposta durante uma ultrapassagem (*P35* a *P38*). Para o espaço entre um veículo na faixa oposta e outro que deseja finalizar uma ultrapassagem (*P39* a *P42*), o AG forneceu valores menores que o simulador, enquanto que o inverso ocorreu para *P41* e *P42*. Encontraram-se valores menores para o tempo necessário para um veículo realizar uma ultrapassagem (*P31* a *P34*). De maneira geral, esses valores encontrados com a calibração através do AG sugerem que os motoristas brasileiros possuem um comportamento mais agressivo do que os motoristas americanos.

4.4. Calibração do modelo de desempenho do CORSIM

Para calibração do modelo de desempenho do CORSIM, os experimentos de simulação foram realizados em rampas compostas de dois segmentos, sendo o primeiro segmento plano com 2 km de extensão e o segundo segmento com até 5 km e inclinação variável de acordo com o observado em campo (Figura 4.3). No campo, as curvas de desempenho de alguns caminhões (velocidade vs. distância) foram obtidas com o uso de GPS em um segmento da Rodovia Washington Luís (ver Capítulo 3). Foram consideradas as curvas obtidas somente nas rampas ascendentes do segmento percorrido. Com isso, foi possível obter rampas empíricas semelhantes ao apresentado na Figura 4.3, cujo primeiro segmento foi necessário para limitar a velocidade de entrada na rampa. Assim, as curvas simulada e empírica iniciavam com a mesma velocidade.

Figura 4.3: Segmento usado para calibração do modelo de desempenho do CORSIM

Em cada corrente de tráfego, somente foi simulado um veículo por vez (de determinada categoria) com as características observadas em campo, evitando-se, dessa forma, a influência da lógica de *car-following*. O tempo de cada simulação foi de 30 minutos, suficiente para que o veículo complete o trajeto ao longo do segmento.

Como apresentado no Capítulo 3, a amostra de caminhões com dados sobre o desempenho veicular foi organizada em quatro categorias, pois o CORSIM somente consegue simular até esse número de categorias. Foram definidas as seguintes categorias para os caminhões: leves, médios, pesados e extrapesados, tendo sido, cada uma, calibrada separadamente. Outras características do AG podem ser vistas na seção a seguir.

4.4.1. Função *fitness*

A comparação entre as curvas de desempenho observada e simulada foi feita através da seguinte função *fitness*:

$$F(I) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N MANE_k, \quad (4.4)$$

em que $F(I)$: valor da função *fitness* do cromossomo I ;

$MANE_k$: erro normalizado absoluto médio do cromossomo I para o caminhão k ;

N : quantidade de caminhões observados de uma categoria.

O valor da função *fitness* do cromossomo I representa a diferença entre a curva de desempenho obtida da simulação e a observada no campo, medida através da diferença entre a velocidade simulada e a velocidade observada a cada 100 m da rampa ascendente:

$$MANE_k = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{|V_{i,sim} - V_{i,obs}|}{V_{i,obs}}, \quad (4.5)$$

em que $V_{i,sim}$: velocidade simulada no ponto i da rampa para o caminhão k ;

$V_{i,obs}$: velocidade observada no ponto i da rampa para o caminhão k ;

m : número de pontos na rampa do caminhão k , espaçados em 100 m.

4.4.2. Parâmetros de calibração

Os parâmetros ajustáveis do modelo de desempenho do CORSIM estão armazenados no *Record Type 173* do CORSIM (RT173), que contém valores de acelerações máximas para velo-

cidades variando de 0 ft/s a 110 ft/s (0 a 120 km/h), segundo uma função descendente. A Tabela 4.4 apresenta o espaço de busca para o AG para às acelerações máximas correspondentes às velocidades de 0 a 110 ft/s.

Tabela 4.4: Espaço de busca para os parâmetros do modelo de desempenho do CORSIM

Velocidade (ft/s)	Leves		Médios		Pesados		Extrapesados	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
10	1,21	9,02	0,50	3,88	0,82	7,21	0,27	6,19
20	1,17	8,96	0,00	5,43	0,00	7,20	0,00	5,03
30	0,05	8,30	0,00	3,97	0,00	4,32	0,00	2,95
40	0,00	5,77	0,00	2,76	0,00	2,95	0,61	2,00
50	0,00	4,21	0,45	2,02	0,49	2,15	0,41	1,45
60	0,00	3,08	0,26	1,53	0,31	1,60	0,26	1,07
70	0,41	2,19	0,09	1,14	0,17	1,19	0,13	0,79
80	0,09	1,44	0,00	0,83	0,04	0,86	0,02	0,55
90	0,00	0,79	0,00	0,55	0,00	0,57	0,00	0,35
100	0,00	0,17	0,00	0,29	0,00	0,31	0,00	0,16

Esses intervalos foram definidos a partir do programa TruPer [Demarchi, 2000]. Desenvolvido no Visual Basic 5.0, TruPer é uma macro criada, inicialmente, como suplemento do Microsoft Excel 97, mas que ainda funciona em versões mais recentes, como o Microsoft Excel 2010. O programa foi criado para simular o desempenho de veículos rodoviários e ferroviários. No caso dos caminhões, dados como o peso e a potência são usados para determinar as forças atuantes no veículo ao longo de um segmento com uma dada geometria.

Todos os veículos que tiveram seus perfis de desempenho obtidos com GPS foram simulados no TruPer em rampas ascendentes, de 0% a 7%, a fim de obter dados de velocidade e aceleração a cada 1,0 s. Para cada uma das quatro categorias de caminhões, foram determinados os valores máximo e mínimo das acelerações de acordo com as classes de velocidades encontradas no RT173 do CORSIM. Assim, as acelerações que tiveram como velocidade correspondente valores entre 0 ft/s e 15 ft/s foram agrupadas para determinar o espaço de busca quando a classe da velocidade for 10 ft/s no CORSIM. Para a classe de 20 ft/s, foram agrupadas as velocidades entre 15 ft/s e 25 ft/s, e assim por diante. As classes 0 ft/s e 110 ft/s não foram calibradas porque não foram observados esses valores em campo, tendo sido mantidos os valores *default* do simulador (Tabela 4.5).

4.4.3. Resultados da calibração e da validação

Após aplicação do AG para calibração do modelo de desempenho do CORSIM, os valores de MAE entre as curvas de desempenho observada e simulada foram de 2,75%, 2,82%, 4,13% e 2,45% na calibração e 2,14%, 3,98%, 3,66% e 2,93% na validação para as categorias de veí-

culos leves, médios, pesados e extrapesados, respectivamente. Usando-se os parâmetros *default* do simulador, os valores encontrados para *MAE* para o conjunto da calibração foram: 17,93%; 10,37%; 9,86%; e 5,00%.

Para a categoria Extrapesado, a melhoria com a aplicação do AG foi grande em termos percentuais, da ordem de 40%, mas não tão grande em termos absolutos do *MAE*, uma vez que os valores *default* se adequavam bem à categoria. Para as outras categorias, a aplicação do AG proporcionou uma diminuição em torno de 60% para os médios e os pesados e de mais de 80% para os caminhões leves. A Tabela 4.5 mostra os valores calibrados para serem utilizados no RT173 do CORSIM.

Tabela 4.5: Valores calibrados e *default* para os parâmetros do modelo de desempenho

Velocidade (ft/s)	Leves		Médios		Pesados		Extrapesados	
	AG	<i>default</i>	AG	<i>default</i>	AG	<i>default</i>	AG	<i>default</i>
10	3,89	5,35	1,10	2,42	1,32	2,37	1,68	2,14
20	1,44	4,94	0,91	2,15	0,72	1,81	1,66	1,42
30	1,12	3,47	0,91	2,04	0,72	1,56	0,77	1,12
40	0,62	3,09	0,75	1,74	0,50	1,25	0,65	0,85
50	0,62	2,61	0,61	1,42	0,50	0,97	0,46	0,63
60	0,47	2,14	0,30	1,12	0,36	0,73	0,35	0,44
70	0,30	1,70	0,16	0,83	0,25	0,52	0,18	0,29
80	0,10	1,27	0,15	0,56	0,25	0,32	0,13	0,14
90	0,06	0,86	0,08	0,30	0,20	0,14	0,09	0,00
100	0,06	0,46	0,00	0,04	0,00	-0,05	0,07	-0,14

Percebe-se que as acelerações máximas obtidas para o caso brasileiro são sistematicamente menores do que os valores *default*, que refletem o caso americano. Esse resultado era esperado, uma vez que os caminhões brasileiros, geralmente, têm uma idade média alta e, por essa razão, tendem a ter um desempenho comparativamente pior. Isso explica a melhoria do valor da função *fitness* encontrada com a aplicação do AG.

4.5. Considerações finais

Este capítulo teve, como objetivo principal, apresentar o método e os resultados da calibração e da validação realizada para o CORSIM. A partir de dados coletados em campo, foi utilizado um AG para realizar o ajuste dos parâmetros do simulador da seguinte forma: (i) das lógicas comportamentais (*car-following*, ultrapassagens e velocidades desejadas); e (ii) do modelo de desempenho dos veículos pesados.

Após a calibração e a validação do simulador, foi possível constatar uma melhora das funções *fitness* em comparação com a versão do CORSIM usando-se os valores *default* dos parâmetros. A Figura 4.4 apresenta, de maneira gráfica, como a versão recalibrada do CORSIM

consegue fornecer melhores resultados do que o CORSIM não calibrado. Para o conjunto de dados usados na calibração, a figura mostra os pontos fluxo-velocidade unidirecionais obtidos antes e após a aplicação do AG, em comparação com os dados de campo.

Figura 4.4: Pontos fluxo-velocidade unidirecionais antes (a) e após a calibração (b) em comparação com os dados obtidos em campo para o conjunto de dados usados na calibração do CORSIM

Percebe-se que, para fluxos menores do que 500 veic/h, houve uma aproximação dos dados simulados com os dados de campo. Para as correntes de tráfego acima de 500 veic/h, o ajuste apresentou-se ainda mais eficaz: sem a calibração, as velocidades foram, em geral, superestimadas; após o ajuste dos parâmetros, as velocidades apresentaram-se bem mais próximas dos dados de campo.

A partir dos resultados apresentados, considera-se que a calibração e a validação do CORSIM foram suficientes para representar o comportamento dos locais onde os dados de campo foram coletados. Dessa forma, o simulador foi usado para realizar os experimentos necessários para alcançar os objetivos desta pesquisa, o que serão mostrados nos capítulos a seguir.

5. Estimativas da *PTSF* a partir de dados de campo

O Capítulo 2 apresentou as medidas de desempenho utilizadas pelo HCM2010 para determinar o nível de serviço em rodovias de pista simples: a velocidade média de viagem (*ATS*) e a porcentagem de tempo viajando em pelotões (*PTSF*), voltadas para rodovias de classe I e II, e porcentagem da velocidade de fluxo livre (*PFFS*), usada para avaliar rodovias de classe III.

A *PTSF* surgiu na versão do HCM de 1985 [TRB, 1985] com a nomenclatura “porcentagem de tempo em atraso” (*percent time delay*). Para que pudesse ser mais compatível com sua definição, ela foi renomeada para *PTSF* no HCM2000. A *PTSF* apesar de ser, conceitualmente, uma boa medida de desempenho, ela é praticamente impossível de ser obtida em campo. Para isso, deveria existir, pelo menos, um pesquisador em cada veículo de uma corrente de tráfego a fim de determinar o tempo que estão em pelotões. Outra maneira de obter a *PTSF* seria por meio de simulação, mas isso obrigaria os usuários do HCM a terem um conhecimento específico sobre simuladores de tráfego, o que poderia inviabilizar o uso do manual em muitos casos.

A definição de *PTSF* indica que ela deve ser obtida para um segmento de rodovia suficientemente longo e homogêneo. No entanto, o HCM sugere que a *PTSF* seja estimada a partir de porcentagem de veículos em pelotões (*PF*), uma medida de desempenho que deve ser obtida para um ponto da rodovia. Essa aproximação gera um conflito conceitual que pode provocar estimativas erradas para a *PTSF*, como mostrou Dixon *et al.* [2002]. Na literatura, há trabalhos em que são propostos modelos teóricos para estimar a *PTSF* a partir de outras medidas de desempenho facilmente coletadas em campo, não necessariamente a *PF*. Sendo assim, os seguintes questionamentos podem ser feitos:

- É possível usar a *PF* como medida *proxy* da *PTSF* levando em conta a situação brasileira?
- É possível desenvolver um modelo de tráfego para obter a *PTSF* em função da *PF* e de outras informações da rodovia?

- Os modelos teóricos existentes na literatura para estimar a *PTSF* funcionam bem para as rodovias brasileiras?

A partir desses questionamentos, o objetivo deste capítulo foi avaliar qual seria a melhor maneira de estimar a *PTSF* com base em dados obtidos diretamente da observação do tráfego. A *PTSF* obtida de um simulador calibrado (CORSIM) para cada segmento de rodovia estudada foi usada para analisar a qualidade das estimativas propostas.

5.1. Revisão da literatura

Uma revisão da literatura mostra que diversos autores consideram a *PF* uma *proxy* inadequada da *PTSF* e há uma preocupação entre pesquisadores da área em encontrar uma forma de relacionar a *PTSF* com parâmetros que possam ser observados diretamente da corrente de tráfego. Alguns métodos propostos foram estabelecidos em função da análise de ondas de choque [Pursula, 1995], da teoria dos gargalos móveis [Laval, 2006] ou da teoria de filas [Polus e Cohen, 2009]. Essas três abordagens são resumidas a seguir.

5.1.1. Estimativa da *PTSF* a partir da análise de ondas de choque

A análise das ondas de choque estuda correntes de tráfego em função das discontinuidades provocadas por diferenças na densidade – um congestionamento, por exemplo, é uma região da corrente de tráfego com densidade maior que as densidades a montante e a jusante. Essas discontinuidades da densidade são as ondas de choque que se propagam pela corrente de tráfego com velocidade determinada pela densidade e fluxo em cada lado da onda de choque [Kondyli e Elefteriadou, 2011].

Pursula [1995] parte da hipótese de que uma corrente de tráfego em regime não congestionado numa rodovia de pista simples possui dois estados distintos: dentro e fora de pelotões. Veículos mais lentos lideram os pelotões; veículos mais rápidos viajam em velocidade mais alta até encontrarem um pelotão. Dentro de um pelotão, os veículos mais rápidos procuram ultrapassar o líder; ao ultrapassar o líder do pelotão, esses veículos se tornam veículos “livres” e viajam em velocidade mais alta até encontrar o próximo pelotão.

Dessa forma, ao longo de um percurso, os veículos mais rápidos constantemente alternam seu estado entre “em pelotão” e “livre”. A corrente de tráfego pode então ser dividida em dois estados (pelotões e veículos “livres”) e que, num estado de equilíbrio, o número de veículos

dentro e fora dos pelotões se mantém constante ao longo de um percurso. Dentro dos pelotões, a densidade é k_1 , a velocidade média no espaço é u_1 e a distância viajada em pelotões é ℓ_1 . Fora dos pelotões, a densidade da corrente de tráfego é k_2 e a velocidade média no espaço é u_2 ; o comprimento da via em que os veículos viajam “livres” é ℓ_2 . A *PTSF* pode ser definida como a relação:

$$PTSF = \frac{\text{veic} \cdot h \text{ em pelotões no trecho}}{\text{veic} \cdot h \text{ no trecho}}, \quad (5.1)$$

em que $\text{veic} \cdot h$ é o produto veículos×tempo de viagem. Se t_1 é o tempo em que os veículos viajam em pelotões e t_2 é o tempo de viagem fora dos pelotões, então pode-se escrever que

$$PTSF = \frac{k_1 \ell_1 (t_1 + t_2)}{k_1 \ell_1 (t_1 + t_2) + k_2 \ell_2 (t_1 + t_2)} = \frac{k_1 \ell_1}{k_1 \ell_1 + k_2 \ell_2}. \quad (5.2)$$

A partir da observação do tráfego em um ponto da rodovia, é possível obter N_1 , o número de veículos em pelotões, e N_2 , o número de veículos fora de pelotões e *PF*, a porcentagem de veículos em pelotões é:

$$PF = \frac{N_1}{N_1 + N_2}. \quad (5.3)$$

N_1 e N_2 não são iguais ao número de veículos dentro ($k_1 \ell_1$) e fora dos pelotões ($k_2 \ell_2$) ao longo do segmento porque, enquanto um pelotão passa por um ponto de coleta, novos veículos são adicionados aos dois estados do tráfego.

Da equação fundamental do tráfego, sabe-se que $q_1 = u_1 \cdot k_1$ e $q_2 = u_2 \cdot k_2$. Admite-se, ainda, que a corrente está em equilíbrio e a velocidade da onda de choque (a transição entre o pelotão e o tráfego livre) é

$$w = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2} = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1}, \quad (5.4)$$

e pode-se calcular o tempo total de viagem, t ,

$$t = t_1 + t_2 = \frac{\ell_1 + \ell_2}{w} = \frac{\ell}{w}, \quad (5.5)$$

em que ℓ é o comprimento do segmento estudado ($\ell = \ell_1 + \ell_2$).

Isso que implica que a Equação 5.3 toma a forma:

$$PF = \frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{q_1 t_1}{q_1 t_1 + q_2 t_2} = \frac{u_1 k_1 \ell_1 / w}{u_1 k_1 \ell_1 / w + u_2 k_2 \ell_2 / w} = \frac{u_1 k_1 \ell_1}{u_1 k_1 \ell_1 + u_2 k_2 \ell_2}. \quad (5.6)$$

e a taxa de fluxo de tráfego, q , é

$$q = \frac{N_1 + N_2}{t} = \frac{q_1 t_1 + q_2 t_2}{t} = \frac{u_1 k_1 \ell_1 / w + u_2 k_2 \ell_2 / w}{\ell / w} = \frac{u_1 k_1 \ell_1 + u_2 k_2 \ell_2}{\ell}. \quad (5.7)$$

Reescrevendo-se a Equação 5.6, de modo a usar a Equação 5.7 e a relação fundamental do tráfego, tem-se que

$$PF = \frac{u_1 \cdot k_1 \cdot \ell_1}{u_1 \cdot k_1 \cdot \ell_1 + u_2 \cdot k_2 \cdot \ell_2} = \frac{u_1 \cdot k_1 \cdot \ell_1}{q \cdot \ell} = \frac{u_1 \cdot k_1 \cdot \ell_1}{u \cdot k \cdot \ell}. \quad (5.8)$$

A velocidade média no espaço pode ser calculada das velocidades observadas no local de observação como a média harmônica das velocidades observadas, ou seja,

$$u = \frac{\frac{N_1 + N_2}{u_1} + \frac{N_2}{u_2}}{\frac{q_1 t_1 + q_2 t_2}{u_1} + \frac{q_2 t_2}{u_2}} = \frac{u_1 k_1 \frac{\ell_1}{w} + u_2 k_2 \frac{\ell_2}{w}}{k_1 \frac{\ell_1}{w} + k_2 \frac{\ell_2}{w}} = \frac{u_1 k_1 \ell_1 + u_2 k_2 \ell_2}{k_1 \ell_1 + k_2 \ell_2}. \quad (5.9)$$

A densidade da corrente ao longo do segmento, k , pode ser calculada usando-se a equação fundamental do tráfego e as Equações 5.7 e 5.9, de tal forma que

$$k = \frac{q}{u} = \frac{k_1 \ell_1 + k_2 \ell_2}{\ell}. \quad (5.10)$$

Usando-se a Equação 5.10, a Equação 5.2 pode ser reescrita de tal forma que

$$PTSF = \frac{k_1 \cdot \ell_1}{k_1 \cdot \ell_1 + k_2 \cdot \ell_2} = \frac{k_1 \cdot \ell_1}{k \cdot \ell}. \quad (5.11)$$

Substituindo-se a Equação 5.11 na Equação 5.8, encontra-se um modelo para estimar a *PTSF* em função da *PF*:

$$PF = \frac{u_1 \cdot k_1 \cdot \ell_1}{u \cdot k \cdot \ell} = \frac{u_1}{u} \cdot \frac{k_1 \cdot \ell_1}{k \cdot \ell} \Rightarrow PTSF = \frac{u}{u_1} PF . \quad (5.12)$$

A formulação pode ser estendida para um segmento formado por um conjunto de n segmentos. O leitor interessado pode encontrar a dedução dessa extensão em Pursula [1995]. Uma deficiência desta abordagem é a suposição de que a corrente de tráfego está num estado de equilíbrio tal que os comprimentos dos pelotões são constantes – ou seja, a velocidade da onda de choque na frente do pelotão é igual à velocidade da onda de choque na traseira do pelotão. Não se pode garantir que tal condição sempre exista na corrente de fluxo observada.

5.1.2. Estimativa da *PTSF* através da teoria dos gargalos móveis

Laval [2006] propôs uma adaptação da teoria dos gargalos móveis, que é derivada da teoria das ondas de choque, para estudar o efeito de um veículo lento em uma corrente de tráfego numa rodovia de pista simples; dessa maneira, obteve uma formulação capaz de estimar a *PTSF*. Supondo um segmento de rodovia de pista simples em que os segmentos de ultrapassagem proibida podem ser desprezados, a corrente de tráfego em cada sentido pode ser representada por um diagrama fundamental do tráfego triangular definido por uma velocidade livre u_f , capacidade Q e uma velocidade de onda de choque $-w$, como se mostra na Figura 5.1(a).

Figura 5.1: Representação do fenômeno estudado: (a) Diagrama fundamental do tráfego; e (b) diagrama espaço-tempo [adaptado de Laval (2006)]

Admitindo-se que a corrente de tráfego é formada por uma parcela r de veículos lentos (por ex., caminhões) que viajam em velocidade v , e por outra parcela de veículos rápidos (carros), cuja velocidade máxima é u_f , tal que $u_f > v$, o diagrama espaço-tempo da Figura 5.1(b) representa a formulação do problema. A região A do diagrama espaço-tempo representa a região na via em que a corrente de tráfego apresenta as condições mostradas no ponto A do diagrama fundamental: fluxo Q_A e densidade K_A e velocidade u_f .

Um veículo lento na corrente, viajando em velocidade v , provoca o aparecimento de um pelotão (região 1, em vermelho, no diagrama espaço-tempo). A traseira deste pelotão progride ao longo do segmento em velocidade $s < u_f$. Os veículos rápidos, viajando em velocidade livre u_f , alcançam o pelotão à jusante (ponto 1 no diagrama fundamental) e passam a fazer parte dele até que os veículos rápidos à sua frente no pelotão consigam ultrapassar o veículo lento. No pelotão, a corrente tem densidade K_1 , fluxo Q_1 e velocidade $-w$. Ao ultrapassar o veículo lento, os veículos rápidos saem do pelotão e entram na região 2 (em bege no diagrama espaço-tempo), que corresponde ao ponto 2 no diagrama fundamental (densidade K_2 , fluxo Q_2 e velocidade u_f). Os veículos lentos, que lideram os pelotões, são constantemente ultrapassados pelos veículos mais rápidos, na medida em que a corrente de tráfego no sentido oposto oferece oportunidades de ultrapassagem. Pode-se notar as similaridades entre o problema estudado por Laval [2006] e o estudado por Pursula [1995].

De acordo com a teoria dos gargalos móveis, a fronteira entre as regiões 1 (pelotão) e 2 (fora do pelotão) é uma reta de declividade v . Se as condições do estado 2 (fora do pelotão) são conhecidas, é possível encontrar as condições do estado 1 (pelotão) traçando-se uma reta de declividade v que passe pelo ponto 2 e intercepte o ramo congestionado do diagrama fundamental. Este ponto de interseção representa o estado 1 (ponto 1 no diagrama fundamental). Pode-se demonstrar que [Laval, 2006; p. 939]

$$k_1 = \frac{c}{v} - \frac{\bar{c}}{w} q_2, \quad q_1 = c + \bar{c} \cdot q_2, \text{ e } \quad v_2 = \frac{q_1}{k_1}, \quad (5.13)$$

em que $\bar{c} = 1 - c$, sendo

$$c = \frac{Q_1}{Q} = \frac{(u_f + w)v}{(v + w)u_f} \quad (5.14)$$

e $q_i = Q_i / Q$, a relação entre o fluxo no estado i e a capacidade Q ; e ainda, $k_i = K_i / Q$. O comprimento do pelotão, ℓ_1 , e o comprimento do segmento entre pelotões, ℓ_2 , é dado por

$$\ell_1 = \frac{(v-s)u_f}{(u_f-s)r \cdot q_A} \text{ e } \ell_2 = \frac{(u_f-v)s}{(u_f-s)r \cdot q_A}. \quad (5.15)$$

Apenas o caso em que $0 \leq s \leq v$ (ou, de modo equivalente, $q_2 \leq q_A \leq q_1$) interessa. Quando $q_A < q_2$, não há a formação de pelotões e todos os veículos velozes viajam na velocidade de fluxo livre ($PTSF = 0$); quando $q_A > q_1$, o pelotão cresce continuamente até todos os veículos no segmento estarem viajando no pelotão ($PTSF = 100\%$).

Segundo Laval [2006], a única incógnita do problema é q_2 e, ao invés de tentar estimá-la com base em observações empíricas, Laval propõe determinar seu valor em função de um modelo desenvolvido com base na hipótese de que uma ultrapassagem só é possível quando o tráfego no sentido oposto está em fluxo livre. O modelo proposto é

$$q_2 = \frac{c_0 + (\eta' q_A - \eta q_{A'})c - \sqrt{c_1 + c_2 q_A + c_3 q_{A'} + c^2 (\eta' q_A - \eta q_{A'})^2}}{2(c + \eta' \bar{c})c} \quad (5.16)$$

em que os parâmetros com linha (como η') referem-se à corrente na direção oposta da estudada, com

$$\eta = \frac{c + \bar{c} \cdot q_A}{c + \bar{c} \cdot q_{A'}} c \cdot \bar{q}_{A'} \text{ e } \eta' = \frac{c + \bar{c} \cdot q_{A'}}{c + \bar{c} \cdot q_A} c \cdot \bar{q}_A, \quad (5.17)$$

(com $\bar{q}_i = 1 - q_i$) e ainda

$$\begin{aligned} c_0 &= c^2 (\eta + \eta') - \bar{c}^2, \\ c_1 &= c^4 (\bar{\eta}^2 + \bar{\eta}'^2 - 1) - \eta \eta' [2c^2 (\bar{c}^2 (\eta + \eta') + 2c\bar{c} + 1) - \bar{c}^4 \eta \eta'], \\ c_2 &= 2(\eta \eta' + 2\eta \bar{\eta}' c + \bar{\eta}' \bar{\eta} c^2) c \eta' \text{ e} \\ c_3 &= 2(\eta \eta' + 2\eta' \bar{\eta} c + \bar{\eta}' \bar{\eta} c^2) c \eta. \end{aligned}$$

Sabendo-se que a $PTSF$ é dada pela razão $t_1/(t_1+t_2)$, em que $t_1 = \ell_1/(v_1 - v)$ e $t_2 = \ell_2/(u_f - v)$, pode-se obter a seguinte expressão para estimá-la

$$PTSF = \left(w - \frac{q_2 \cdot v \cdot \bar{c}}{c} \right) \frac{(q_A - q_2)}{\left[w \cdot q_A - (v + w) \bar{c} \cdot q_2 \right]}. \quad (5.18)$$

Uma deficiência clara desta abordagem é a complexidade da sua formulação matemática. Outro aspecto negativo que os modelos baseados em análise de ondas de choque [Pursula, 1995] e teoria dos gargalos móveis possuem em comum é que ambos supõem que os veículos rápidos ultrapassam o veículo lento sempre que houver um *gap* adequado na corrente oposta, o que nem sempre é verdade. Ainda que alguns motoristas hesitem em realizar ultrapassagens e outros sejam mais agressivos, é impossível garantir que, na média, o comportamento será sempre como o suposto pelo modelo.

5.1.3. Estimativa da $PTSF$ baseada na teoria das filas

Outra expressão para estimar a $PTSF$ em função de dados observáveis em campo é baseada na teoria das filas [Polus e Cohen, 2009; Cohen e Polus, 2011]. Os parâmetros que devem ser obtidas da observação direta do tráfego são dois: Q_0 , o número médio de *headways* observados dentro dos pelotões, e N_0 o número médio de *headways* observados fora dos pelotões. A Figura 5.2 mostra um exemplo das medidas Q_0 e N_0 calculadas para uma corrente de tráfego hipotética, em que $Q_0 = (1 + 2 + 2)/3 = 1,67$ e $N_0 = (3 + 1)/2 = 2,00$.

Figura 5.2: Exemplo de obtenção das variáveis Q_0 e N_0 para um segmento hipotético

Supondo que um pelotão liderado por um veículo lento é como uma fila M/M/1, a intensidade do tráfego (ρ) é definida como a relação entre o tempo médio que o primeiro veículo

veloz do pelotão espera até ultrapassar o veículo lento que lidera o pelotão e o tempo médio entre chegadas à traseira do pelotão. O número médio de *headways* numa fila é

$$Q_0 = 1/(1 - \rho). \quad (5.19)$$

Como o número médio de *headways* dentro dos pelotões pode ser facilmente observado no campo, pode-se obter a intensidade do tráfego pela expressão [Gross e Harris, 1985, p. 73]

$$\rho = 1 - \frac{1}{Q_0}. \quad (5.20)$$

Ao analisar dados de 30 segmentos de rodovias, Cohen e Polus [2011] constataram que uma distribuição geométrica representava bem a probabilidade de obter um determinado Q_0 . Sendo assim, é possível denominar uma probabilidade π de encontrar veículos lentos sem ter veículos rápidos impedidos por ele (que é uma fila “vazia”), mas que eventualmente irão criar pelotões em um momento posterior da viagem. Essa distribuição geométrica também possibilita denominar a probabilidade de encontrar um sistema não vazio, como mostra a equação:

$$\text{Prob}\{Q = i\} = \begin{cases} \pi, & \text{se } i = 0 \\ (1 - \pi) \cdot (1 - \rho) \cdot \rho^{i-1}, & \text{se } i > 0 \end{cases} \quad (5.21)$$

em que i é o número de *headways* dentro de pelotões. Para $\pi = 0$, o número médio de veículos em pelotão $\ell = Q_0$. Para $\pi > 0$, $\pi = 1 - \rho$ e $\ell = Q_0 - 1$.

Supondo-se que t_1 é o tempo médio gasto pelos veículos viajando em pelotões (desde a entrada no pelotão até o início da manobra de ultrapassagem) e que t_2 é o tempo médio de viagem fora dos pelotões, *PTSF* pode ser definida como:

$$PTSF = 100 \frac{t_1}{(t_1 + t_2)}, \quad (5.22)$$

A variável t_1 pode ser expressa como $t_1 = \ell / \lambda$, em que λ é a taxa de chegada de veículos rápidos à traseira do pelotão e pode ser expressa como o inverso do *headway* médio de chegadas ao final do pelotão, h_b . Dessa forma, para diferentes valores de π , têm-se que

$$t_1 = \begin{cases} Q_0 \cdot h_b, & \text{se } \pi = 0 \\ (Q_0 - 1)h_b, & \text{se } \pi = 1 - \rho \end{cases} \quad (5.23)$$

O tempo médio de viagem fora dos pelotões, t_2 , por sua vez, pode ser considerado como o produto entre o número médio de *headways* fora dos pelotões N_0 e o *headway* médio h_b

$$t_2 = N_0 \cdot h_b. \quad (5.24)$$

Combinando-se as Equações 5.22 a 5.23, a *PTSF* pode ser estimada com base em dados de campo da seguinte forma

$$PTSF = \begin{cases} 100 \frac{Q_0}{N_0 + Q_0}, & \text{se } \pi = 0 \\ 100 \frac{Q_0 - 1}{N_0 + Q_0 - 1}, & \text{se } \pi = 1 - \rho \end{cases} \quad (5.25)$$

Cohen e Polus [2011] recomendam usar a *PTSF* da Equação 5.25 quando $\pi = 0$, com a justificativa de ter fornecido valores mais próximos daqueles encontrados no HCM. Adicionado a isso, essa formulação não provoca uma *PTSF* igual a zero quando $Q_0 = 1$, o que ocorre quando $\pi = 1 - \rho$. Em razão disso, a primeira linha da Equação 5.25 foi usada para os testes apresentados nas seções seguintes deste trabalho.

5.2. Calibração e validação do CORSIM

Como a *PTSF* não pode ser obtida diretamente em campo, ela foi estimada por meio de simulações com o CORSIM. Para isso, o simulador teve que ser calibrado e validado, mas com uma diferença importante em relação à aplicação do AG apresentado no Capítulo 4: o CORSIM foi calibrado, individualmente, para cada um dos 16 segmentos de rodovias filmados. Nesse caso, foram utilizados todos os dados obtidos para cada segmento. O intuito foi fornecer valores da *PTSF* mais acurados para cada segmento. As demais características do AG (*fitness*, tamanho da população, taxas dos operadores genéticos, período de *warm-up*, número de gerações, etc.) foram mantidas em relação à aplicação do capítulo anterior. Não foi necessário calibrar o modelo de desempenho novamente, somente os modelos comportamentais, uma vez que o primeiro é ajustado para caminhões trafegando numa rampa ascendente sem interferência de outros veículos.

Para cada uma das 16 aplicações do AG, metade das correntes de tráfego foi utilizada para calibração e outra metade para validação do simulador calibrado e também para validação das estimativas da *PTSF*. Os resultados da calibração apresentaram *fitness* variando de 0,68 a 0,90 (média = 0,86). Na validação, os valores da função objetivo apresentaram-se entre 0,70 e 0,87 (média = 0,85). Esses resultados mostram que há forte correlação entre os histogramas construídos com as observações de campo e os histogramas criados com os dados gerados pelo simulador calibrado para cada local.

5.3. Análise da qualidade das estimativas da *PTSF*

A qualidade das estimativas da *PTSF* produzidas pelos métodos apresentados na revisão da literatura foi avaliada através da comparação dos valores estimados com os valores da *PTSF* produzidos pelo CORSIM, calibrado individualmente para cada segmento observado nesta pesquisa. Este procedimento foi adotado já que a *PSTF* não pode ser medida diretamente em campo e é análogo ao usado no desenvolvimento do método do HCM [Harwood *et al.*, 1999].

Além dos quatro modelos discutidos na revisão da literatura, uma quinta alternativa foi também avaliada: um modelo que estima a *PTSF* em função da *PF*, que o HCM recomenda usar como uma medida *proxy* de *PTSF*, mas que também inclui outros parâmetros relacionados ao tráfego. Os parâmetros escolhidos para isso foram: o fluxo na direção estudada (q_d), a porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida (*NPZ*). O modelo linear calibrado com os dados das rodovias de pista simples paulistas foi:

$$PTSF = 0,4854 \cdot PF + 0,0287 \cdot q_d + 0,0997 \cdot NPZ \quad (R^2 = 0,94), \quad (5.26)$$

Dessa forma, os métodos avaliados foram: (i) o método do HCM2010, que sugere o uso de *PF* (com base no *headway* crítico de 3 s) como uma medida *proxy* da *PTSF*; (ii) o modelo proposto por Pursula [1995], mostrado na Equação 5.12; (iii) o modelo da Equação 5.18, baseado na teoria dos gargalos móveis de Laval [2006]; (iv) a Equação 5.25, baseado na teoria de filas [Cohen e Polus, 2011]; e (v) a Equação 5.26, o modelo proposto que fornece a *PSTF* como função da *PF* e de outros parâmetros do local, relacionados ao tráfego e à via.

A verificação da qualidade das estimativas de *PTSF* produzidas pelos modelos de simulação calibrados foi feita usando-se o segundo conjunto de dados, ou seja, os dados que não foram usados na calibração dos modelos. As estimativas produzidas com cada modelo foram

comparadas com os valores da $PTSF$ obtidos das versões do CORSIM calibradas para cada segmento estudado. Como pode ser visto na Figura 5.3, as estimativas apresentaram-se bastante divergentes dos valores obtidos com o CORSIM quando o fluxo de tráfego foi baixo (quando também se observaram baixos valores da $PTSF$).

Figura 5.3: Comparação entre valores da $PTSF$ obtidos com o CORSIM e estimados por: (a) PF , como sugerido pelo HCM; (b) pelo modelo sugerido por Pursula (1995); (c) pelo modelo de Cohen e Polus (2011); (d) pelo modelo de Laval (2006); e (e) com o novo modelo proposto neste trabalho

Para cada corrente de tráfego, o número de estimativas da *PTSF* variava, pois algumas eram baseadas em variáveis coletadas para um segmento e outras para um ponto da rodovia – que variava de 2 a 6 estações de coleta. Sendo assim, o número de estimativas da *PTSF* não foi igual a 110 (total de correntes de tráfego reservadas para validação), mas um número maior do que isso, em torno de 420 estimativas, no total.

A comparação das estimativas baseadas nos modelos teóricos com os valores da *PTSF* fornecidos pelo CORSIM foi realizada através de algumas das funções *fitness* mostradas na Tabela 4.1 (Capítulo 4). As funções escolhidas para avaliar a capacidade preditiva dos modelos propostos foram: (i) Erro normalizado médio (*MNE*); (ii) Erro normalizado absoluto médio (*MANE*); (iii) Raiz quadrada do erro normalizado quadrático médio (*RMSNE*); e (iv) Coeficiente de correlação (*r*). As formulações dessas funções *fitness* são:

$$MNE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i - y_i}{y_i}, \quad (5.27)$$

$$MANE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{y_i}, \quad (5.28)$$

$$RMSNE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2}, \quad (5.29)$$

$$r = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (5.30)$$

em que: x_i : estimativa fornecida por um modelo para uma corrente de tráfego i ;

y_i : *PTSF* fornecida pelo CORSIM para uma corrente de tráfego i ;

$\bar{x}$, $\bar{y}$: valores médios de x e y para N correntes de tráfego avaliadas; e

σ_x , σ_y : desvios padrão de x e y para N correntes de tráfego avaliadas.

Algumas razões para a escolha dessas funções *fitness* para avaliar a qualidade das estimativas incluem:

- O *MNE* indica um erro sistemático como, por exemplo, se um modelo tende a subestimar a medida de desempenho;
- O *MANE* indica um erro médio em termos absolutos, sem considerar se há desvios sistemáticos;

- A função *RMSNE* penaliza erros grandes nos valores produzidos pelos modelos, ao contrário do *MNE* e do *MANE*; e
- O coeficiente de correlação r é amplamente conhecido e reflete tanto o desvio em torno da média como em função da dispersão dos valores gerados pelos modelos. Vale ressaltar que indica proporcionalidade entre os dados, e, não necessariamente, igualdade. Deve ser usado a partir dos valores das outras funções *fitness*.

A Tabela 5.1 mostra os valores encontrados para as funções *fitness*, sendo que *MNE* e *MANE* podem ser expressos em porcentagem. Os coeficientes de correlação foram em torno de 0,80, com exceção para o modelo de Laval [2006], com r igual a 0,63, e para o novo modelo, que apresentou coeficiente r de 0,88. Os valores encontrados para *MNE* mostram que as estimativas não possuíam uma diferença sistemática (valores distantes de 0%) em relação aos dados de campo, com exceção do modelo de Laval [2006], que forneceu valores da *PTSF*, em média, 18% maiores do que os valores encontrados com o CORSIM.

Tabela 5.1: Funções *fitness* encontradas para as estimativas da *PTSF*

Estimativas da <i>PTSF</i>	Funções <i>fitness</i>			
	<i>MNE</i>	<i>MANE</i>	<i>RMSNE</i>	r
<i>PF</i>	-3%	31%	2,37	0,78
Pursula [1995]	-5%	31%	2,51	0,80
Cohen e Polus [2011]	-11%	34%	2,26	0,78
Laval [2006]	18%	27%	2,89	0,63
Novo modelo	1%	44%	1,69	0,88

Para as cinco estimativas, foram encontrados altos valores para os erros médios relativos (*MANE*), em torno de 30%, sendo que, para o novo modelo, os resultados foram até piores, acima de 40%. Os valores da função *fitness RMSNE* indicaram que o modelo de Laval [2006] apresentou os maiores erros ($RMSNE = 2,89$), enquanto que o novo modelo proposto nesta pesquisa forneceu, em média, os menores erros ($RMSNE = 1,69$). No entanto, para essa amostra analisada, especificamente, consideraram-se bons resultados para *RMSNE* valores abaixo de 1,00, o que não ocorreu para nenhuma das estimativas propostas.

Analisando-se esses resultados, pode-se concluir que os modelos para *PF* e os propostos por Pursula [1995], Cohen e Polus [2011] e Laval [2006] produziram estimativas da *PTSF*

que divergiram bastante dos valores da *PTSF* encontrados com o CORSIM calibrado para cada local. O novo modelo proposto foi o único que forneceu uma estimativa razoável em boa parte da distribuição dos dados, como mostra a Figura 5.3e, com exceção dos valores da *PTSF* em torno de 40% a 60%, encontrados em fluxos de tráfego intermediários.

Sob o ponto de vista da aplicabilidade dos modelos testados, o de Laval [2006] parece ser o mais complicado para ser utilizado no dia a dia por tomadores de decisão e técnicos. Vale lembrar que uma das premissas básicas para propor uma medida de desempenho é que ela, além de refletir a opinião do usuário, também seja de fácil aplicação e entendimento.

Com base nos resultados encontrados neste capítulo, é possível afirmar, ao menos para os dados coletados nesta pesquisa, que nenhuma das estimativas produzidas pelos modelos teóricos forneceu resultados confiáveis, levando-se em consideração os valores encontrados para as funções *fitness*. Os coeficientes de correlação até indicam que há uma proporcionalidade, mas as demais funções *fitness*, assim como a Figura 5.3, mostram que as estimativas ainda possuem uma diferença grande para os dados obtidos com o CORSIM. Usar esses modelos para estimar a *PTSF* poderia provocar erros na determinação do nível de serviço. Assim sendo, foi necessário estudar medidas de desempenho alternativas à *PTSF*, o que é apresentado no capítulo a seguir.

6. Avaliação de medidas de desempenho

A meta traçada nesta tese foi determinar medidas de desempenho para rodovias de pista simples de modo que fossem adequadas ao contexto brasileiro. Para facilitar a aplicação do método pelo usuário, manuais de tráfego rodoviário, como o HCM2010 e o HBS2001, fornecem modelos que relacionam o fluxo de tráfego com medidas de desempenho da qualidade de serviço. Esta seção descreve a obtenção desses modelos para tráfego, parte importante do método para indicar as medidas de desempenho mais apropriadas.

6.1. Visão geral do método de avaliação

Este capítulo tem por objetivo analisar medidas de desempenho do tráfego em rodovias de pista simples, que tem, como parte central do método, o desenvolvimento de modelos de tráfego. A Figura 6.1 mostra uma visão geral do método para condução dessa análise.

Figura 6.1: Método de avaliação das medidas de desempenho

O método inicia-se com a coleta de dados de tráfego em campo, que são usados para calibrar e validar o CORSIM (Capítulo 4). O simulador é ajustado a fim de reproduzir o comportamento médio encontrado nas rodovias observadas. Assim, dados de tráfego sintéticos podem ser gerados para segmentos de rodovias com geometrias observadas em campo e com velocidade de fluxo livre e porcentagem de veículos pesados específicos.

A partir desses dados, modelos de tráfego unidirecionais – que relacionam o fluxo de tráfego com determinada medida de desempenho – são obtidos sem faixas adicionais e com as

zonas de ultrapassagens proibidas posicionadas em locais com visibilidade insuficiente para ultrapassar. O efeito da proibição de ultrapassagens e da inclusão de faixas adicionais é avaliado separadamente, usando-se as mesmas combinações anteriores (geometria, velocidades de fluxo livre e porcentagem de veículos pesados).

Com esses modelos, são determinados os valores das medidas de desempenho para outra parte dos dados de tráfego obtidos das filmagens, o que conduz a uma análise dessas estimativas comparando-se com os valores observados em campo. Essa comparação determina se uma dada medida de desempenho poderia ser indicada ou não. Caso ela esteja apta a ser usada, é preciso determinar quais serão os critérios para definir os níveis de serviço usando-se as medidas de desempenho mais adequadas. Por fim, deve ser avaliado se o método proposto subestima ou superestima o nível de serviço em comparação com o método do HCM2010, que tem sido amplamente recomendado pelos órgãos brasileiros que gerenciam o tráfego em rodovias.

6.2. Produção de dados de tráfego sintéticos

Define-se dado de tráfego sintético aquele que não é obtido da observação direta do tráfego, mas criado utilizando-se um simulador de tráfego. O método proposto consiste em gerar, através de um simulador calibrado para representar rodovias típicas no Brasil, um conjunto sintético de dados de tráfego semelhante aos obtidos por sensores instalados em rodovias. Nesta seção, esse método será explicado sucintamente e maiores detalhes podem ser vistos em Bessa Jr. e Setti [2011a], em que o processo foi originalmente proposto.

Tradicionalmente, a variabilidade dos resultados de simulações é obtida mudando-se as sementes das sequências de números pseudoaleatórios usadas no simulador. O *software* é calibrado e usa-se o conjunto de valores dos parâmetros de simulação que minimiza as diferenças entre o fluxo observado e o simulado [FHWA, 2004; Egami *et al.*, 2006; Araújo e Setti, 2008]. Essa abordagem, no entanto, limita a variabilidade dos resultados das simulações. Para este trabalho, a variabilidade no tráfego simulado foi amplificada para reproduzir a variação natural do tráfego através da variação dos valores dos parâmetros de calibração do simulador (Capítulo 4) e não só da variação das sementes das sequências de números pseudoaleatórios.

A calibração e validação do simulador, realizadas por meio do AG determina um conjunto de soluções viáveis (conjunto de valores dos parâmetros de calibração que produzem resultados viáveis) produzidas durante a busca da solução ótima (a que produz a menor diferença entre o fluxo observado e o simulado). Desse conjunto, seleciona-se um subconjunto de “so-

luções quase ótimas”, que produzem diferenças entre os fluxos simulado e observado marginalmente superiores ao mínimo produzido pela solução ótima. Desse subconjunto de boas soluções, podem-se produzir distribuições de frequência dos valores dos parâmetros de calibração do modelo, que podem ser usadas para introduzir variabilidade nos dados sintéticos criados por meio de simulação.

Para produzir cada cenário sintético, os parâmetros de calibração são escolhidos através de uma amostragem de Monte Carlo [McLean, 1989, p. 184–185], que consiste em obter o valor de uma variável através de um número aleatório e de uma distribuição de probabilidade conhecida. O valor da variável é obtido admitindo-se que o número aleatório gerado corresponde à probabilidade acumulada. No caso dos parâmetros dos modelos, consideram-se as distribuições de frequência relativa acumulada obtida do conjunto de boas soluções como as distribuições de probabilidade usadas para gerar os cenários sintéticos.

Em Bessa Jr. e Setti [2011a], o simulador escolhido para gerar os dados sintéticos foi o TWOPAS, um modelo microscópico de simulação de tráfego usado na elaboração do capítulo de rodovias de pista simples do HCM [Harwood *et al.*, 1999]. Nesta pesquisa, foi utilizado o simulador CORSIM, que foi calibrado e validado como descrito anteriormente.

A escolha do conjunto de boas soluções foi baseada numa análise de sensibilidade usando-se quatro limites: 15%, 50%, 85% ou 100% das melhores soluções. A Figura 6.2 mostra os dados sintéticos gerados com os parâmetros de calibração desses conjuntos, por meio da Amostragem de Monte Carlo, em comparação com os dados de campo obtidos de um sensor instalado numa rodovia paulista (SP-98). A Figura 6.2c mostra a melhor adequação dos dados simulados aos dados de campo e, por essa razão, foi escolhido o limite de 85% das melhores soluções. Nesta pesquisa, foi escolhido o mesmo limite para aplicação com o CORSIM.

A escolha de um conjunto grande de soluções testadas pelo AG para gerar dados sintéticos (85%) indica que uma grande parte dos cromossomos testados ao longo das gerações produz valores altos para a função *fitness*, próximos da melhor solução encontrada. Isso é uma característica comum em calibrações utilizando AG, que ocorre principalmente porque a otimização realizada é bastante eficiente e as piores soluções são logo excluídas da população. Como o algoritmo continua atuando durante mais gerações para procurar um ótimo global, é criada uma grande quantidade de cromossomos que produz resultados apenas marginalmente piores que o ótimo ao longo do processo – soluções “quase ótimas”.

Figura 6.2: Resultados da análise de sensibilidade conduzida para encontrar o conjunto de boas soluções do AG. Simulações com o TWOPAS para: (a) 15%; (b) 50%; (c) 85%; ou (d) 100% das melhores soluções [Bessa Jr. e Setti, 2011a]

Para produzir um determinado modelo de tráfego (ver item 6.4), deve-se simular N dados sintéticos de acordo com a geometria, uma determinada porcentagem de veículos pesados e uma velocidade de fluxo livre. O método para criação desses N dados sintéticos pode ser descrita pelo pseudocódigo:

```

Determinar o número de dados sintéticos desejados  $N$ ;
Para  $i = 1$  a  $N$ ,
    Gerar taxas de fluxo unidirecionais  $V(i)$ ;
    Gerar os valores dos parâmetros de calibração  $C(i)$  a partir das distribuições acumuladas de frequência dos parâmetros de calibração encontrados nas soluções "quase ótimas" testadas pelo AG;
    Escolher a porcentagem de veículos pesados a serem simulados em segmentos com geometrias semelhantes;
    Escolher as sementes dos números aleatórios para a simulação;
    Simular a corrente de tráfego com a taxa de fluxo  $V(i)$ , os parâmetros  $C(i)$  e as sementes dos números aleatórios;
    Obter a taxa de fluxo e o valor da medida de desempenho desejada da corrente de tráfego a partir dos resultados da simulação;
Repetem-se os passos anteriores até  $i = N$ ;

```

Os resultados desse método de produção de dados de tráfego sintéticos para obter modelos de tráfego podem ser visualizados na seção 6.4.

6.3. Geometria das vias

Tanto nos manuais de tráfego HCM e HBS quanto em estudos brasileiros [Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr. e Setti, 2012; Bessa Jr. e Setti, 2012], modelos de tráfego foram desenvolvidos para segmentos hipotéticos. No entanto, quase sempre a geometria desses segmentos não é observada em campo, pois não foi baseada em critérios de projetos geométricos de vias. Por essa razão, nesta pesquisa, para geração de dados sintéticos e obtenção de modelos de tráfego, serão utilizados segmentos de rodovias observados em campo. Com essa estratégia, procurou-se produzir modelos de tráfego que se adequassem melhor às condições de estradas brasileiras do que modelos que, porventura, viessem a ser obtidos com segmentos hipotéticos.

Para produção dos dados sintéticos, foram considerados segmentos de estradas em locais onde estão os sensores de tráfego avaliados neste trabalho. Da amostra de locais com os laços indutivos apresentada no Capítulo 3, não foram considerados aqueles onde, também, foram realizadas as filmagens. Isso foi feito para que fossem usados segmentos distintos para gerar os dados sintéticos – que servirão para gerar os modelos de tráfego – e para calibrar o CORSIM e analisar os modelos de tráfego desenvolvidos. Com essa estratégia, espera-se obter uma maior confiabilidade na avaliação dessas relações de tráfego.

A instalação de sensores de tráfego pelo órgão gerenciador de uma estrada é, quase sempre, feita com o intuito de coletar informações sobre segmentos homogêneos. Sendo assim, foram delimitados segmentos homogêneos de até 10 km – que continham a posição do sensor – para serem modelados no CORSIM. Foram determinados segmentos homogêneos menores de 10 km quando havia neles algo que influenciava o tráfego, como, por exemplo, um acesso a uma rodovia ou outra estrada, uma lombada, uma ponte, um posto policial, devido à proximidade com uma região urbana, etc. A Tabela 6.1 resume as informações sobre os 34 segmentos homogêneos que foram usados para gerar os dados sintéticos com o CORSIM.

Tabela 6.1: Características do projeto geométrico dos segmentos homogêneos usados para gerar dados sintéticos

Rodovia	Localização do sensor (km)	Comprimento do segmento (km)	RF (m/km)	KU (graus/km)
MG-050	75	7,8	25,04	51,08
MG-050	82,5	4,1	17,14	166,15
MG-050	91,1	10,0	17,89	56,76
MG-050	104	8,7	20,85	10,03
MG-050	130	3,1	20,79	52,61
MG-050	142,2	5,0	28,15	34,22
MG-050	151,1	10,0	25,42	18,75
MG-050	199	10,0	32,16	27,00
MG-050	217,3	10,0	29,99	17,51
MG-050	272,2	10,0	26,98	46,00
MG-050	316	10,0	27,28	64,91
MG-050	334	10,0	23,97	4,53
MG-050	356	8,2	31,60	28,79
MG-050	361	7,2	19,42	4,93
MG-050	379	10,0	32,69	53,90
MG-050	390	10,0	27,43	83,35
BR-265	649	10,0	28,04	23,88
SP-352	183	8,7	23,25	65,72
SP-215	80,2	10,0	21,74	12,73
SP-191	14,4	7,6	30,45	21,36
SP-191	70,5	6,8	29,26	147,90
SP-300	139,3	9,0	37,29	88,21
SP-127	70,8	10,0	18,23	8,65
SP-127	98,8	6,2	18,35	9,60
SP-215	42,6	7,7	15,18	17,54
SP-344	226,2	4,0	22,66	6,51
SP-270	55,5	2,0	43,54	88,91
SP-270	61,5	2,4	45,62	277,03
SP-270	78,2	4,0	31,22	86,31
SP-300	186,7	7,7	15,18	17,54
SP-300	241	2,0	29,73	55,64
SP-101	49,2	7,5	28,63	17,70
SP-101	69,5	10,0	21,89	15,26
SP-113	11,8	4,8	17,95	15,06

Para representar o alinhamento vertical dos segmentos homogêneos, foi utilizado o parâmetro *Rise and Fall* (RF), apresentado em alguns trabalhos [Watanatada *et al.*, 1987; Kerali *et al.*, 2000]. É definido como a quantidade de subidas e descidas, em metros, de um determinado segmento com comprimento em km, sendo, portanto, o RF dado em m/km. Segmentos com RF abaixo de 20 m/km representam relevos planos, enquanto segmentos com RF em torno de 80 m/km representam segmentos com relevo montanhoso. Baseado nisso, foram estabelecidas classes de rodovias com alinhamentos verticais semelhantes, da seguinte forma: $0 \leq RF \leq 20$ m/km; $20 < RF \leq 40$ m/km; $40 < RF \leq 60$ m/km; $60 < RF \leq 80$ m/km; e $RF > 80$ m/km.

O parâmetro RF tem sido abordado em trabalhos desenvolvidos no Brasil. Nunes *et al.* [2010] usaram o RF para analisar, economicamente, a influência do alinhamento vertical nos custos de construção de rodovias. Andrade e Setti [2011] basearam-se nesse parâmetro para caracterizar segmentos homogêneos de rodovias de pista dupla paulistas com o intuito de auxiliar nos estudos em rodovias. O Manual de Gerência de Pavimentos do DNIT [DNIT, 2011] utiliza o Sistema HDM-4 (*Highway Development and Management System*) para realizar as avaliações econômicas necessárias para utilização do Sistema de Gerência de Pavimentos do DNIT (SGP-DNIT). O parâmetro RF consiste numa das informações necessárias para utilizar o HDM-4. Dessa maneira, buscando-se propor um método que seja fácil de utilizar e que possa ser compatibilizado com outros métodos para avaliar rodovias brasileiras, a utilização do RF parece ser razoável.

Outro parâmetro que é usado pelo HDM-4 e, conseqüentemente, pelo SGP-DNIT, é a curvatura KU , definido como o somatório das mudanças angulares no alinhamento horizontal, dado em graus, em um determinado segmento de rodovia com comprimento dado em km. O parâmetro KU também foi usado em Andrade e Setti [2011] para caracterizar segmentos homogêneos de rodovias de pista dupla paulistas. A sigla KU é a mesma utilizada no manual alemão HBS2001 e que foi apresentada no Capítulo 2. Por essa razão, a sigla foi mantida. Nesse manual, os alinhamentos horizontais foram organizados em quatro categorias de acordo com o valor de KU (entre 0 e 67°/km; entre 67 e 132°/km; entre 132 e 202°/km; e acima de 202°/km). Neste trabalho, foram considerados cinco categorias do alinhamento horizontal para caracterização de segmentos homogêneos: $0 \leq KU \leq 50$ °/km; $50 < KU \leq 100$ °/km; $100 < KU \leq 150$ °/km; $150 < KU \leq 200$ °/km; e $KU > 200$ °/km.

Com cinco categorias para o alinhamento vertical e cinco categorias para o alinhamento horizontal, é possível dizer que, do ponto de vista da geometria, podem existir 25 tipos de segmentos homogêneos. Os 34 segmentos selecionados para gerar dados sintéticos tiveram seus valores do RF e do KU calculados (Tabela 6.1). Eles foram, então, organizados em função desses valores em um dos 25 tipos supracitados, conforme pode ser visto na Tabela 6.2. Pode-se perceber que, dessas 25 categorias, somente oito foram observadas, sendo que, em algumas delas, há apenas um dos 34 segmentos homogêneos selecionados.

Tabela 6.2: Classificação dos segmentos homogêneos em função das características do projeto geométrico

<i>RF</i> (m/km)	<i>KU</i> (graus/km)				
	0-50	50-100	100-150	150-200	> 200
0-20	5	1	–	1	–
20-40	15	9	1	–	–
40-60	–	1	–	–	1
60-80	–	–	–	–	–
> 80	–	–	–	–	–

Para que um modelo pudesse ser gerado, foi considerada uma premissa: ele teria que ser testado para os segmentos que foram filmados. Nesse caso, foram determinados os valores de *RF* e *KU* para os 16 segmentos observados por meio das filmadoras, como podem ser observados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Características do projeto geométrico dos segmentos onde houve filmagem para coleta de dados

Rodovia	km inicial	km final	<i>RF</i> (m/km)	<i>KU</i> (°/km)
SP-215	133	138,5	38,27	0,00
SP-225	113	121	28,39	18,97
SP-225	133	141	33,81	9,27
SP-253	151	155	10,00	0,00
SP-322	382,5	388,3	16,86	0,00
SP-253	161	168	6,47	37,95
SP-255	54	60	16,81	0,00
SP-255	162,2	168,5	39,43	1,93
SP-318	262	266	32,53	0,00
SP-255	139	145	39,89	5,36
SP-98	93,8	97,4	9,52	13,52
SP-123	7,9	13,3	15,28	20,74
SP-308	102,5	108,0	28,97	13,65
SP-300	168,5	172,5	29,36	146,89
SP-270	82,0	89,0	18,35	193,54
SPA-110/330	1,0	2,5	13,58	0,00

A Tabela 6.4 mostra quais as categorias das combinações encontradas entre *RF* e *KU* para os segmentos observados com as filmadoras. Comparando-a com a Tabela 6.2 – que contempla os segmentos com os sensores – percebe-se que quatro combinações entre *RF* e *KU* não foram encontradas para os segmentos filmados. Em razão disso, foram desenvolvidos somente modelos de tráfego para as outras quatro combinações de *RF* e *KU*, pois elas puderam ser validadas com os dados de campo obtidos das filmagens (que possuem mais controle na coleta do que os dados obtidos dos sensores de tráfego). A obtenção desses modelos pode ser visualizada na seção a seguir.

Tabela 6.4: Classificação dos segmentos observados com filmadoras em função da geometria

<i>RF</i> (m/km)	<i>KU</i> (graus/km)				
	0-50	50-100	100-150	150-200	> 200
0-20	7	–	–	1	–
20-40	7	–	1	–	–
40-60	–	–	–	–	–
60-80	–	–	–	–	–
> 80	–	–	–	–	–

6.4. Modelos de tráfego

No HBS2001, a medida de desempenho usada para avaliar a qualidade de serviço em rodovias de pista simples é a densidade dos automóveis. No HCM, a densidade é usada para determinar o nível de serviço em rodovias de pista dupla e em autoestradas. A densidade é obtida a partir de relações fluxo-velocidade, um dos modelos de tráfego mais usados para avaliar o fluxo em rodovias, inclusive brasileiras [Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr. e Setti, 2012].

Algumas das medidas de desempenho avaliadas neste trabalho podem ser obtidas diretamente das relações fluxo-velocidade para automóveis. Isso ocorre com o atraso percentual ($PD_{d,car}$) e a densidade ($D_{d,car}$), ambos para automóveis na direção analisada, cujos motoristas são os que mais influenciam na determinação da qualidade de serviço [FGSV, 2005]. Essas medidas de desempenho, portanto, possuem a seguinte formulação, também apresentadas no Capítulo 2:

$$D_{d,car} = \frac{q_d}{ATS_{d,car}}, \quad (6.1)$$

$$PD_{d,car} = \frac{ATT_{d,car} - ATT_{FFS_d}}{ATT_{FFS_d}} \times 100, \quad (6.2)$$

sendo q_d : fluxo de tráfego direcional (veic/h);

$ATS_{d,car}$: velocidade média de viagem dos automóveis na direção analisada (km/h);

$ATT_{d,car}$: tempo médio de viagem dos automóveis na direção analisada (s); e

ATT_{FFS_d} : tempo médio de viagem se a velocidade média de viagem fosse igual à FFS_d na direção analisada (s).

Além dessas duas, a própria velocidade média de percurso dos automóveis ($ATS_{d,car}$) foi uma medida de desempenho avaliada. Outras medidas de desempenho representam, principalmente, o desconforto do motorista em viajar retidos atrás de veículos lentos e servem de

alternativa ao uso da *PTSF*. Por esse motivo, elas serão avaliadas em outro momento, tendo sido, primeiro, analisadas as três primeiras medidas de desempenho supracitadas que provêm das relações fluxo-velocidade.

6.4.1. Relações fluxo-velocidade

Foram avaliados dois modelos para a relação fluxo-velocidade: um modelo linear, utilizado no HCM2010 (Equação 6.3), e um modelo côncavo, que é usado pelo HBS2001 (Equação 6.4). Seguindo a tendência do HCM e do HBS, foram obtidos somente modelos direcionais sem considerar a influência do fluxo oposto no sentido analisado, cuja forma geral é:

$$ATS_{d,car} = a + b \cdot q_d, \quad (6.3)$$

$$ATS_{d,car} = a + b \cdot \sqrt{q_d}, \quad (6.4)$$

em que: $ATS_{d,car}$: velocidade média de viagem direcional dos automóveis (km/h);

FFS_d : velocidade de fluxo livre direcional (km/h);

q_d : fluxo de tráfego no sentido analisado (veic/h); e

a_1, a_2, b_1, b_2 : parâmetros obtidos por regressão.

Para uma dada velocidade de fluxo livre direcional (FFS_d), foram desenvolvidas 24 curvas entre o fluxo e a velocidade média de viagem, resultantes da combinação de quatro valores entre os parâmetros RF e KU (Tabela 6.4) e seis valores para a porcentagem de veículos pesados P_{hv} (de 0 a 50%, em intervalos de 10%). Foram obtidos modelos para quatro valores de FFS_d (70, 80, 90 e 100 km/h), resultando em $4 \times 6 \times 4 = 96$ relações fluxo-velocidade. Para que houvesse 500 correntes de tráfego na regressão de cada modelo, foram simuladas $500 \times 96 = 48.000$ cenários, replicados cinco vezes cada. Os modelos foram gerados sem faixas adicionais e com as zonas de ultrapassagens observadas em campo.

Para verificar a adequabilidade desses modelos, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) das regressões. Em cada modelo obtido por regressão linear, foi determinada uma estatística de teste F com um nível de significância $\alpha = 5\%$. Para os dois modelos, todas as regressões tiveram suas hipóteses nulas rejeitadas e, portanto, são estatisticamente válidas. As Tabelas 6.5 e 6.6 mostram os parâmetros a e b obtidos para os modelos linear e côncavo com FFS_d igual a 70 km/h.

Tabela 6.5: Parâmetros do modelo linear da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 70$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	64,61	-0,015	0,73	67,26	-0,017	0,77	≤ 50	68,11	-0,020	0,78	62,14	-0,019	0,77
100 – 150	-	-	-	58,67	-0,014	0,76	100 – 150	-	-	-	54,53	-0,028	0,69
150 – 200	57,91	-0,012	0,65	-	-	-	150 – 200	59,60	-0,020	0,82	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	66,60	-0,017	0,75	68,16	-0,023	0,77	≤ 50	67,30	-0,018	0,77	61,97	-0,021	0,74
100 – 150	-	-	-	57,11	-0,026	0,71	100 – 150	-	-	-	54,58	-0,030	0,80
150 – 200	57,96	-0,015	0,74	-	-	-	150 – 200	61,57	-0,022	0,85	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	64,05	-0,015	0,73	69,36	-0,026	0,78	≤ 50	63,60	-0,016	0,71	62,30	-0,023	0,76
100 – 150	-	-	-	57,91	-0,033	0,77	100 – 150	-	-	-	57,55	-0,032	0,85
150 – 200	57,18	-0,015	0,68	-	-	-	150 – 200	58,86	-0,020	0,85	-	-	-

Tabela 6.6: Parâmetros do modelo côncavo da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 70$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	64,61	-0,520	0,80	67,26	-0,587	0,84	≤ 50	68,11	-0,668	0,86	62,14	-0,613	0,83
100 – 150	-	-	-	58,67	-0,488	0,83	100 – 150	-	-	-	54,53	-0,707	0,80
150 – 200	57,91	-0,391	0,71	-	-	-	150 – 200	59,60	-0,649	0,87	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	66,60	-0,580	0,83	68,16	-0,746	0,86	≤ 50	67,30	-0,608	0,84	61,97	-0,629	0,81
100 – 150	-	-	-	57,11	-0,637	0,79	100 – 150	-	-	-	54,58	-0,763	0,88
150 – 200	57,96	-0,481	0,82	-	-	-	150 – 200	61,57	-0,683	0,90	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	64,04	-0,512	0,80	69,36	-0,825	0,87	≤ 50	63,60	-0,508	0,79	62,30	-0,703	0,82
100 – 150	-	-	-	57,91	-0,792	0,85	100 – 150	-	-	-	57,54	-0,870	0,92
150 – 200	57,18	-0,484	0,78	-	-	-	150 – 200	58,86	-0,661	0,88	-	-	-

Os coeficientes de determinação R^2 também podem ser observados nas tabelas. Pode-se notar que, para o modelo côncavo, R^2 é sistematicamente maior do que para o modelo linear. No entanto, os valores encontrados de R^2 para o modelo côncavo são apenas marginalmente maiores que os R^2 do modelo linear, sugerindo que o modelo linear também é razoável e pode ser usado, como indicou o teste F citado anteriormente. O mesmo comportamento de R^2 foi encontrado para os modelos com FFS_d iguais a 80, 90 e 100 km/h, como pode ser visto no Apêndice A. Para efeito de comparação com dados de campo em seções subsequentes, foi escolhido o modelo côncavo para a relação fluxo-velocidade.

A Figura 6.3 mostra um exemplo dos modelos obtidos por regressão a partir de dados sintéticos gerados com o CORSIM, para $RF \leq 20$ m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$, $P_{hv} = 0\%$ e $FFS = 80$ km/h. Percebe-se que o modelo côncavo se ajusta melhor à nuvem de pontos, o que explica o maior coeficiente R^2 obtido em relação ao modelo linear.

Figura 6.3: Relações fluxo-velocidade obtidas a partir de dados sintéticos para $RF \leq 20$ m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$, $P_{hv} = 0\%$ e $FFS = 80$ km/h: (a) côncava; e (b) linear

Para avaliar o impacto das zonas de ultrapassagens proibidas, um primeiro experimento foi realizado: foram simulados os segmentos usados para gerar os dados sintéticos sem zonas de ultrapassagens proibidas e com as zonas observadas em campo. Foram calculadas as diferenças de velocidades nos dois casos. Percebeu-se que esse valor era pequeno, sem correlação com a porcentagem de zonas de ultrapassagens proibidas. Isso ocorre porque as zonas são colocadas em regiões onde não há visibilidade suficiente. No simulador, mesmo que a manobra seja permitida, os motoristas não fazem a ultrapassagem se a distância de visibilidade não for suficiente. Supõe-se que, de maneira semelhante, isso ocorra também em campo.

Foram desenvolvidos modelos para determinar qual seria o decréscimo de velocidade se houvesse zonas de ultrapassagens em regiões onde a causa não fosse a falta de visibilidade (exemplo: pontes, regiões urbanas, etc.). Foram apresentados somente modelos que puderam ser avaliados com os dados de campo obtidos das filmagens. Nesses lugares, não foram encontradas regiões com proibição de ultrapassagens devido a fatores diferentes da distância de visibilidade de ultrapassagem. Sendo assim, os modelos obtidos não foram considerados.

Para determinar o impacto das faixas adicionais, foram modelados no CORSIM os segmentos usados para gerar os dados sintéticos sem e com as faixas adicionais e foi calculado qual seria o acréscimo de velocidade com a implantação da faixa. Em cada segmento, foram simuladas as mesmas correntes de tráfego usadas para obter as relações fluxo-velocidade das Tabelas 6.5 e 6.6 e do Apêndice A. Foram estudadas as correlações entre as diferenças de velocidade para os segmentos com e sem as faixas adicionais ($\Delta ATS_{d,car}$) e os valores dos fluxos direcionais, da porcentagem de veículos pesados, do RF , da curvatura KU e do comprimento L e da declividade i da faixa adicional.

O comprimento L foi a variável dependente que apresentou a maior correlação com os valores de $\Delta ATS_{d,car}$. A inclusão de algumas das outras variáveis dependentes, apesar de ter correlação com as diferenças de velocidade, não aumentou muito o coeficiente de determinação R^2 do modelo. Por essa razão, somente o comprimento L da faixa adicional foi suficiente como variável para estimar as diferenças de velocidades, conforme a formulação:

$$ATSpI_{d,car} = ATS_{d,car} + 0,00589 \cdot L. \quad (6.5)$$

em que: $ATSpI_{d,car}$: velocidade média de viagem dos automóveis para segmentos com faixa adicional (km/h); e

$ATS_{d,car}$: velocidade média de viagem dos automóveis para segmentos sem faixas adicionais (km/h) (Tabelas 6.5 e 6.6 e Apêndice A).

Uma vez obtidas as relações fluxo-velocidade e os modelos para determinar o impacto da inclusão de faixas adicionais, foi avaliado se os modelos forneciam valores adequados para a velocidade média de viagem direcional e para as medidas de desempenho $PD_{d,car}$ e $D_{d,car}$, que provêm dela. A análise foi conduzida para metade das correntes de tráfego obtida das filmagens, como citado no Capítulo 3. A Figura 6.4 apresenta as medidas de desempenho velocidade média de viagem, atraso percentual e densidade para automóveis obtidos em campo e a partir das relações fluxo-velocidade côncavas.

Figura 6.4: Medidas de desempenho obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) velocidade média de viagem (a); (b) atraso percentual; e (c) densidade

Percebe-se, primeiramente, que a variabilidade das três medidas de desempenho é bem distinta. Para a densidade, foi pequena, enquanto que para a velocidade e, principalmente, para o atraso percentual, ela foi bem maior. Analisando-se os gráficos dessa figura, nota-se que os modelos parecem ter fornecido valores que se adequaram bem às observações de campo.

A comparação dos dados produzidos pelos modelos propostos com os dados de campo foi realizada da mesma forma que durante a análise das estimativas da *PTSF*, no capítulo anterior. Foram calculadas as seguintes funções *fitness*: (i) Erro normalizado médio (*MNE*); (ii) Erro normalizado absoluto médio (*MANE*); (iii) Raiz quadrada do erro normalizado quadrático médio (*RMSNE*); e (iv) Coeficiente de correlação (*r*).

As formulações dos *fitness* foram apresentadas nos dois capítulos anteriores. Dentre as razões para as suas escolhas, ressalta-se a possibilidade de comparar medidas de desempenho que possuem ordens de grandeza diferentes, por avaliar os erros de maneira normalizada; por indicar erros sistemáticos (*MNE*); por indicar erros médios em termos absolutos (O *MANE*); e penalizar erros grandes (*RMSNE*). O coeficiente de correlação r descreve os desvios em torno da média considerando-se, também, da dispersão dos valores gerados pelos modelos.

A Tabela 6.7 mostra os valores encontrados para as funções *fitness*, sendo que *MNE* e *MANE* podem ser expressos em porcentagem. Das três medidas de desempenho, a densidade $D_{d,car}$ foi a que obteve os melhores resultados, com r de 0,99 e valores baixos para as demais funções *fitness* usadas. Para $ATS_{d,car}$ e $PD_{d,car}$, o coeficiente de correlação foi semelhante, em torno de 0,80. No entanto, para o atraso percentual, os valores para *MNE*, *MANE* e *RMSNE* foram bem altos, o que não ocorreu para a velocidade média de viagem.

Tabela 6.7: Funções *fitness* encontradas para as medidas de desempenho fornecidas pelas relações fluxo-velocidade

Medida de desempenho	Funções <i>fitness</i>			
	<i>MNE</i>	<i>MANE</i>	<i>RMSNE</i>	r
ATS_{car}	-3%	8%	0,84	0,82
$PD_{d,car}$	68%	92%	3,79	0,78
$D_{d,car}$	5%	8%	0,29	0,99

Com base nesses resultados, recomenda-se usar, como medida de desempenho para determinar a qualidade de serviço, a velocidade média de viagem e a densidade, ambos para automóveis. Dessa forma, a primeira vai ao encontro do proposto pelo HCM2010 (sendo uma das medidas de desempenho propostas pelo manual), enquanto que a segunda corrobora com o manual alemão HBS2001, que adota $D_{d,car}$ como a única medida de desempenho para determinar o nível de serviço em rodovias de pista simples.

6.4.2. Medidas de desempenho alternativas

Como alternativas, principalmente, ao uso da *PTSF*, foram avaliadas medidas de desempenho que refletem, de alguma forma, o desconforto do motorista em viajar atrás de veículos lentos: (i) a densidade de veículos em pelotões (*FD*); (ii) a porcentagem de veículos em pelotões (*PF*); (iii) a porcentagem de veículos retidos (*PI*); e (iv) três medidas de desempenho que dependem do número médio de veículos dentro e fora dos pelotões (Q_0 e N_0): o tamanho médio

dos pelotões (APL), a intensidade do fluxo (ρ) e a liberdade do fluxo (η). As formulações dessas medidas de desempenho, apresentadas também no capítulo 2, são da seguinte forma:

$$FD = PF \cdot \left(\frac{q}{ATS} \right), \quad (6.6)$$

$$PI = P_p \cdot P_i, \quad (6.7)$$

$$APL = Q_0 + 1, \quad (6.8)$$

$$\rho = 1 - \frac{1}{Q_0}, \quad (6.9)$$

$$\eta = \frac{N_0}{\rho} = \frac{N_0}{\left(1 - \frac{1}{Q_0} \right)}, \quad (6.10)$$

em que: P_p : probabilidade de um veículo ser parte de um pelotão a partir dos *headways*; e

P_i : probabilidade de um veículo estar impedido por viajar a uma velocidade menor do que sua velocidade desejada.

A obtenção dos modelos que relacionam o fluxo unidirecional e as medidas de desempenho supracitadas seguiu a mesma sequência de etapas usada para obter as relações fluxo-velocidade. Com isso, foram obtidos, com base na revisão da literatura [Polus e Cohen, 2009; TRB, 2010; ODOT, 2014] e da observação do formato das nuvens de pontos: um modelo quadrático para estimar FD , uma curva exponencial para encontrar PF e PI , uma relação linear para Q_0 e um modelo hiperbólico para determinar N_0 , todos para uma análise unidirecional, com a inclusão do índice d para indicar quando forem obtidas em uma direção:

$$FD_d = a \cdot q_d^2, \quad (6.11)$$

$$PF_d = 100 - \exp(a \cdot q_d^b), \quad (6.12)$$

$$PI_d = 100 - \exp(a \cdot q_d^b), \quad (6.13)$$

$$Q_{0d} = a \cdot q_d, \quad (6.14)$$

$$N_{0d} = a \cdot q_d^b. \quad (6.15)$$

Os parâmetros dos modelos de tráfego para FFS_d iguais a 70, 80, 90 e 100 km/h podem ser vistos no Apêndice A. A Figura 6.5 ilustra os modelos obtidos a partir dos dados sintéticos de

tráfego gerados com o CORSIM. Percebe-se que, com exceção da densidade de veículos em pelotões, há uma dispersão muito grande nos dados.

Figura 6.5: Modelos obtidos a partir de dados sintéticos para $RF \leq 20$ m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$ e $P_{hv} = 0\%$ para encontrar as medidas de desempenho: (a) densidade de veículos em pelotões; (b) porcentagem de veículos em pelotões; (c) porcentagem de veículos retidos; (d) número médio de veículos em pelotões; e (e) número médio de veículos fora dos pelotões

Para determinar a influência das faixas adicionais nas medidas de desempenho, foi feito um experimento semelhante àquele aplicado para as relações fluxo-velocidade. Foram obtidas as diferenças das medidas de desempenho nos segmentos com as faixas adicionais observadas em campo e sem a presença dessas faixas. As seguintes equações mostram quais foram os modelos encontrados para segmentos com faixas adicionais, considerando-se, como variável dependente, o comprimento L da faixa:

$$FDpl_d = FD_d - 0,000580 \cdot L, \quad (6.16)$$

$$PFpl_d = PF_d - 0,0145 \cdot L, \quad (6.17)$$

$$PIpl_d = PI_d - 0,00434 \cdot L, \quad (6.18)$$

$$Q_0pl_d = Q_{0d} - 0,000178 \cdot L, \quad (6.19)$$

$$N_0pl_d = N_{0d} + 0,000723 \cdot L. \quad (6.20)$$

em que: $FDpl_d, FD_d$: densidade de veículos em pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente (veic/km);

$PFpl_d, PF_d$: porcentagem de veículos em pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente;

$PIpl_d, PI_d$: porcentagem de veículos retidos com e sem as faixas adicionais, respectivamente;

Q_0pl_d, Q_{0d} : número médio de veículos em pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente (veic);

N_0pl_d, N_{0d} : número médio de veículos fora dos pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente (veic);

Nas Equações 6.16 a 6.20, todas as medidas de desempenho para segmentos sem faixas adicionais devem ser encontradas a partir dos coeficientes dos modelos mostrados no Apêndice A. Os modelos de tráfego para encontrar Q_{0d} e N_{0d} foram avaliados a partir das medidas de desempenho que podem ser calculadas a partir dela: tamanho médio dos pelotões (APL_d), intensidade do tráfego (ρ_d) e liberdade de fluxo (η_d). A Figura 6.6 ilustra as medidas de desempenho comparadas com os valores encontrados a partir dos modelos propostos para as seis medidas de desempenho alternativas. Pode-se notar que, com exceção da densidade de veículos em pelotões (FD_d), todas as medidas de desempenho apresentaram uma dispersão muito grande, o que gera um elevado grau de incerteza.

Assim como feito para as medidas de desempenho provenientes das relações fluxo-velocidade, a qualidade das estimativas das demais medidas de desempenho produzidas pelos modelos propostos também foi avaliada através de funções *fitness* MNE ; $MANE$; $RMSNE$; e o coeficiente de correlação r . A Tabela 6.8 mostra esses valores para as estimativas encontrados com os modelos propostos para FD_d , PF_d , PI_d , APL_d , ρ_d e η_d .

Figura 6.6: Medidas de desempenho obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) densidade de veículos em pelotões; (b) porcentagem de veículos em pelotões; (c) porcentagem de veículos retidos; (d) tamanho médio dos pelotões; (e) intensidade do tráfego; e (f) liberdade do fluxo

Figura 6.6 (cont.): Medidas de desempenho obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) densidade de veículos em pelotões; (b) porcentagem de veículos em pelotões; (c) porcentagem de veículos retidos; (d) tamanho médio dos pelotões; (e) intensidade do tráfego; e (f) liberdade do fluxo

Tabela 6.8: Funções *fitness* obtidas para as medidas de desempenho alternativas à *PTSF*

Medida de desempenho	Funções <i>fitness</i>			
	<i>MNE</i>	<i>MANE</i>	<i>RMSNE</i>	<i>r</i>
FD_d	-19%	28%	0,64	0,98
PF_d	12%	27%	2,18	0,81
PI_d	55%	61%	3,17	0,67
APL_d	30%	48%	1,20	0,70
ρ_d	-9%	34%	0,31	0,72
η_d	75%	82%	3,28	0,53

Da Tabela 6.8, algumas conclusões podem ser tiradas para cada medida de desempenho:

- Densidade de veículos em pelotões: foram obtidos bons valores para o coeficiente de correlação e para o *RMSNE*; no entanto, os valores apenas razoáveis para *MNE* e *MANE* devem-se, principalmente, às estimativas produzidas pelo modelo proposto para fluxos próximos da capacidade (acima de 1500 veic/h), que são superestimadas;
- Porcentagem de veículos em pelotões: embora tenha sido encontrado um coeficiente *r* e *MNE* e *MANE* razoáveis, os modelos, em geral, superestimaram PF_d em relação aos dados de campo, resultando em valores altos para *RMSNE*.

- Porcentagem de veículos retidos: foram obtidos valores ruins para todos os *fitness*, já que o modelo superestima grosseiramente valores da medida de desempenho para fluxos superiores a 500 veic/h.
- Tamanho médio dos pelotões: os valores produzidos pelas funções *fitness* *MNE* e *MANE* foram altos e o coeficiente r foi de 70%, enquanto que o *fitness* *RMSNE* teve um valor razoável, de 1,20; os resultados ruins do modelo ocorrem porque os valores da medida de desempenho para fluxos menores que 500 veic/h foram subestimados, em relação aos dados de campo, e foram superestimados para fluxos maiores que 500 veic/h.
- Intensidade do tráfego: apesar do coeficiente de correlação r e do *fitness* *MANE* serem razoáveis, foram encontrados bons valores para *MNE* e *RMSNE*, o que ocorre, principalmente, por causa das correntes de tráfego com baixo fluxo; o modelo forneceu valores superestimados para correntes de tráfego com fluxo acima de 500 veic/h; e
- Liberdade do fluxo: foi obtido um coeficiente de correlação de apenas 53% e altos valores para as demais funções *fitness*, principalmente por causa das correntes de tráfego com fluxo abaixo de 500 veic/h; para fluxos maiores, o modelo acertou muito bem, mas a grande variabilidade dos demais dados fez com que as funções *fitness* fossem ruins.

Das estimativas encontradas com os modelos desenvolvidos, é possível afirmar que aquelas medidas de desempenho que apresentam uma grande variabilidade gera um grau de incerteza que reflete no ajuste dos modelos e nos valores das funções *fitness*. Considerando-se os comentários provenientes da análise da Tabela 6.8, é possível recomendar, como medida de desempenho de rodovias de pista simples, somente a densidade de veículos em pelotões (FD_d). Sendo assim, o nível de serviço poderia ser estimado a partir de FD_d , mas, também, baseadas nas medidas de desempenho provenientes das relações fluxo-velocidade, como visto a seguir.

6.5. Critérios para obtenção do nível de serviço

Esta parte da tese teve como objetivo propor critérios para definir o nível de serviço com base nas medidas de desempenho recomendadas anteriormente: (i) a velocidade média de viagem

dos automóveis ($ATS_{d,car}$); (ii) a densidade dos automóveis ($D_{d,car}$) e (iii) a densidade de veículos em pelotões (FD_d). Como princípio, a velocidade não foi usada sozinha como medida de desempenho por não representar a proximidade entre os veículos como as demais. Por outro lado, não faz sentido usá-la em conjunto com $D_{d,car}$ e FD_d porque, conceitualmente, elas têm a ATS em seu cálculo (Equações 6.1 e 6.6). Sendo assim, conclui-se:

- A $ATS_{d,car}$ apenas poderia ser usada em conjunto com medidas de desempenho como a intensidade do tráfego, a liberdade de fluxo, a porcentagem de veículos em pelotões ou a porcentagem de veículos retidos, à maneira do proposto pelo HCM2010 para rodovias de pista simples de Classe I (ATS e $PTSF$ são avaliadas concomitantemente para determinar o nível de serviço); como nenhuma dessas medidas de desempenho foram propostas, a $ATS_{d,car}$ somente foi considerada como parte da formulação proposta para as outras medidas de desempenho recomendadas, $D_{d,car}$ e FD_d ; e
- É possível dizer que as medidas de desempenho $D_{d,car}$ e FD_d refletem a proximidade dos veículos e, de alguma forma, estão relacionadas com o desconforto dos motoristas em viajar atrás de veículos lentos; além disso, essas medidas de desempenho têm, em sua formulação, a $ATS_{d,car}$, o que não justificaria usá-la em conjunto com $D_{d,car}$ ou FD_d ; assim, elas poderiam ser usadas sozinhas para determinar o nível de serviço, como recomenda o HBS2001 para a primeira e como sugere outros trabalhos [Van As, 2003; ODOT, 2014] para a segunda.

Tanto o HCM quanto o HBS classificam os níveis de serviço em regime de fluxo não congestionado em cinco classes, de A a E. Faz-se necessário encontrar critérios adequados para definir os níveis de serviço. Consideram-se os modelos em condições básicas aqueles com $RF \leq 20$ m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$ e $P_{hv} = 0\%$. Foi aplicado o método de Li e Washburn [2014], apresentado no Capítulo 2, e encontrados os intervalos que definem a mudança de nível de serviço. Os critérios de $D_{d,car}$ e FD_d foram baseados no critério do HCM para $PTSF$. A Tabela 6.9 mostra os intervalos propostos a partir dos resultados obtidos da análise.

Para as correntes de tráfego coletadas em campo com as filmadoras, os níveis de serviço foram calculados segundo o critério do HCM2010 para rodovias de classe I, baseados em ATS_d (obtido em campo) e $PTSF_d$ (representado pela medida *proxy* PF_d , como sugere o manual). Para comparar com esses valores, foram obtidos os níveis de serviço em função da densidade para automóveis e da densidade de veículos em pelotões.

Tabela 6.9: Critérios para determinação do nível de serviço com base nas medidas de desempenho propostas

NS	$D_{d,car}$ (veic/km)	FD_d (veic/km)
A	≤ 4	≤ 2
B	$> 4 - 7$	$> 2 - 4$
C	$> 7 - 10$	$> 4 - 6$
D	$> 10 - 15$	$> 6 - 14$
E	> 15	> 14

A Tabela 6.10 mostra a proporção dos níveis de serviço encontrados para as correntes de tráfego de acordo com o critério encontrado para as medidas de desempenho, segundo o método de Li e Washburn [2014]. A tabela mostra que o critério do HCM2010 foi o que forneceu os piores valores do nível de serviço, com mais de 50% das correntes de tráfego com nível de serviço E. Quando o critério foi baseado na densidade $D_{d,car}$, houve uma distribuição quase igualitária entre os níveis de serviço A, D e E. Quando o critério foi FD_d , a quantidade de níveis de serviço concentrou-se em D, com 50% das correntes de tráfego.

Tabela 6.10: Porcentagens de cada nível de serviço obtidas de acordo com o critério

NS	HCM2010	$D_{d,car}$	FD_d
A	3,8%	30,8%	19,4%
B	8,1%	11,8%	19,0%
C	11,8%	0,9%	3,8%
D	18,0%	24,2%	50,2%
E	58,3%	32,2%	7,6%

Esses resultados demonstram que os critérios do HCM2010 podem precisar de uma revisão, pois, aparentemente, há uma tendência de subestimar os níveis de serviço de segmentos de rodovias de pista simples brasileiras. Provavelmente, essa discrepância ocorre porque, como próprio HCM2010 ressalta [TRB, 2010, v.1, p. 7–8], muito dos diversos métodos propostos pelo manual não foram baseados na opinião do usuário como desejado. Outro aspecto pode ser o desempenho de veículos pesados brasileiros, que é pior do que quando comparados com os caminhões americanos.

7. Conclusões e recomendações

Este trabalho teve como meta principal avaliar e propor medidas de desempenho que pudessem ser adequadas para descrever a qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil. Em vista dos resultados obtidos, conclui-se que três medidas de desempenho poderiam ser usadas: a velocidade média de viagem dos automóveis, a densidade para automóveis e a densidade de veículos em pelotões. A primeira, conceitualmente, faz parte do cálculo das duas últimas. Sendo assim, recomenda-se utilizar um critério baseado ou na densidade para automóveis ou na densidade de veículos em pelotões para determinar o nível de serviço em rodovias brasileiras.

Os resultados encontrados neste trabalho servem de subsídio para desenvolver um método voltado para avaliar a qualidade de serviço em rodovias de pista simples brasileiras, o que ajudaria na criação de um Manual de Capacidade Viária brasileiro. Um manual brasileiro teria grandes implicações na economia brasileira, como a determinação correta do nível de serviço, usada em várias situações, como o acompanhamento de concessões rodoviárias. Isso realmente poderia ocorrer, pois, como indicaram os resultados do Capítulo 6, o método do HCM tende a subestimar o nível de serviço de rodovias locais. Outras conclusões e recomendações importantes são discutidas a seguir.

7.1. Coleta de dados

Neste trabalho, foi obtido um conjunto de dados de tráfego com várias características, compreendendo correntes de tráfego com uma gama ampla de fluxos, variando entre volumes baixos até próximos à capacidade, coletados em locais com geometria viária diversa e bastante representativa das rodovias do estado de São Paulo e de Minas Gerais. Esse conjunto de dados fez com que tanto a calibração e validação do CORSIM, como também a avaliação das medidas de desempenho, ganhassem maior confiabilidade.

Mesmo assim, recomenda-se obter mais dados com fluxos acima de 500 veic/h, visto que o banco de dados contém um número muito maior de observações com fluxos menores que 500 veic/h do que fluxos próximos à capacidade. Um maior número de observações na faixa entre

500 veic/h e a capacidade permitiria melhorar ainda mais a confiabilidade das análises realizadas com esse conjunto de dados.

Em trabalhos futuros, seria importante a coleta de dados em segmentos com perfis geométricos não observados neste trabalho. Isso aumentaria, ainda mais, a abrangência e a confiabilidade da calibração do CORSIM, além de proporcionar o desenvolvimento de outros modelos de tráfego. Nessa linha, recomenda-se também a coleta de dados de tráfego em outros estados brasileiros, talvez planejados por região do país, visto que os únicos dados de segmentos fora do estado de São Paulo disponíveis referem-se a segmentos da MG-050. A falta de estações de monitoramento de tráfego em outros estados, entretanto, dificulta a obtenção desses dados.

7.2. Calibração e validação do CORSIM

A calibração e a validação do CORSIM, realizada por meio de um Algoritmo Genético, foi desenvolvida em duas etapas: para ajustar os parâmetros dos modelos comportamentais do CORSIM e para calibrar o modelo de desempenho do simulador. A aplicação do AG apresentou-se adequada, visto que as funções *fitness* do algoritmo apresentaram uma melhoria em relação aos *fitness* obtidos usando-se os parâmetros *default* fornecidos pelo simulador.

Com relação à calibração dos modelos comportamentais, foram ajustados 42 parâmetros, a maioria relacionada com o modelo de ultrapassagens. Apesar de todos terem sido considerados importantes durante a calibração, recomenda-se, para trabalhos futuros, tentar estimar alguns desses parâmetros em campo. Isso poderia aumentar a eficácia do AG, uma vez que o número de parâmetros de calibração diminuiria. Essa estimativa poderia ser feita, principalmente, para alguns parâmetros do modelo de ultrapassagens. Uma dificuldade, nesse caso, seria a coleta de dados, que poderia necessitar de equipamentos mais sofisticados – como veículos instrumentalizados – ou a necessidade de usar motoristas com diversas características (gênero, idade, agressividade, etc.).

Um terceiro aspecto a ser ressaltado é a necessidade de calibração (ou de pelo menos, verificação da calibração) do modelo de ultrapassagem do CORSIM, pois é difícil avaliar o grau de fidelidade da representação das manobras de ultrapassagem na simulação. Essa tarefa, contudo, requer dados difíceis de serem coletados em campo. Deve-se também ressaltar que este não é um problema exclusivo do CORSIM, mas comum a qualquer simulador de correntes de tráfego, visto que a manobra de ultrapassagem, mesmo em rodovias de pista dupla, envolve um grande número de decisões por parte dos motoristas envolvidos. A representação de um

fenômeno tão complexo, em qualquer simulador, é sempre feita através de um modelo simplificado do comportamento humano e, por isso, inerentemente sujeito a discrepâncias com a realidade.

Com relação à calibração do modelo de desempenho do CORSIM, recomenda-se uma nova aplicação da função *fitness*, que poderia ser calculada para todo o segmento percorrido pelos caminhões, ao invés de considerar somente os aclives. Acredita-se, ainda, que o algoritmo desenvolvido nesta pesquisa poderia ser usado para calibrar outros simuladores, mesmo aqueles que modelam outros tipos de rodovias e vias urbanas.

Outro aspecto que diz respeito ao CORSIM trata-se da produção de dados de tráfego sintéticos. A utilização de uma distribuição para os parâmetros do simulador, ao invés de usar apenas um único valor (da melhor resposta do AG), faz com que seja possível obter modelos de tráfego a partir de uma nuvem de pontos que se assemelha àquelas obtidas em campo, como as produzidas pelos laços indutivos. Esse método também poderia ser usado para simular diversas situações em outros simuladores, seja qual for a aplicação.

7.3. Medidas de desempenho

A avaliação das medidas de desempenho da qualidade de serviço em rodovias de pista simples foi iniciada com uma análise de modelos teóricos cujo objetivo era estimar a *PTSF* a partir de dados de tráfego facilmente observáveis em campo. Dessa análise, foi constatado que todos os modelos propostos apresentaram estimativas ruins, distantes dos valores encontrados com o CORSIM calibrado.

A inadequação dos modelos propostos para estimar a *PTSF* pode estar relacionada com três aspectos. O primeiro deles é a grande variabilidade das estimativas da *PTSF*, que chegavam a ser quase quatro vezes maiores do que os valores encontrados com o CORSIM. Outra razão poderia ser atribuída ao *headway* crítico; o valor adotado para este parâmetro foi 3 s, que é o valor sugerido pelo HCM2010. Se o valor adotado fosse diferente, as estimativas produzidas poderiam ser mais próximas dos valores observados, uma vez que a quantidade de veículos no estado “em pelotão” sofreria alteração. Assim sendo, recomenda-se desenvolver, futuramente, um estudo mais detalhado para encontrar um novo *headway* crítico e, com isso, determinar novas estimativas da *PTSF*. Um método que poderia ser usado é apresentado em Lobo *et al.* [2011].

Foram avaliadas medidas de desempenho que poderiam ser alternativas à *PTSF*, todas apresentadas na revisão da literatura (Capítulo 2). Das nove medidas de desempenho avaliadas, usando-se modelos de tráfego como parte central do método, duas foram consideradas adequadas para substituir a *PTSF*: a densidade dos automóveis e a densidade de veículos em pelotões, conforme citado no início deste capítulo.

Recomenda-se a continuação da análise desses modelos de tráfego para dados coletados fora do estado de São Paulo e de Minas Gerais. A coleta de novos dados poderia incluir segmentos de estradas com uma maior diversidade geométrica, tanto para gerar dados sintéticos quanto para validar os novos modelos de tráfego.

Recomenda-se, também, uma análise mais profunda acerca do impacto nas medidas de desempenho devido à presença de zonas de ultrapassagens proibidas, quando a razão da implantação não é a visibilidade. O mesmo deverá ser feito para avaliar o efeito da implantação de faixas adicionais, pois, ao contrário do HCM2010, o modelo proposto nesta pesquisa foi considerado pouco impactante.

Geralmente, as curvas traçadas em um projeto geométrico têm correlação com a velocidade de projeto estabelecida, o que influi na velocidade de fluxo livre. Sendo assim, valeria a pena analisar, em trabalhos futuros, como desenvolver um modelo para estimar FFS_d em função das variáveis geométricas (RF e KU). Isso diminuiria o número de modelos desenvolvidos por meio de dados sintéticos gerados por simulação.

7.4. Critérios de obtenção do nível de serviço

Foram encontrados critérios para determinar o nível de serviço a partir da densidade para automóveis e da densidade de veículos em pelotões. Os níveis de serviço obtidos com esses critérios foram comparados com aqueles obtidos de acordo com o HCM2010, baseados em *ATS* e em *PTSF*. Dessa análise, pode-se perceber que os níveis de serviço encontrados com o HCM foram, geralmente, piores do que aqueles obtidos com as medidas de desempenho propostas neste trabalho.

Sendo assim, seria importante revisar os critérios do HCM2010, principalmente porque o próprio manual admite que eles não foram desenvolvidos com base na opinião do usuário. O mesmo também deve ser feito para os critérios baseados na densidade dos automóveis e na densidade de veículos em pelotões, propostos nesta pesquisa.

Referências

- Andrade, G. R. [2012] **Capacidade e relação fluxo-velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla**. 123p. Dissertação (Mestrado), EESC-USP, São Carlos.
- Andrade, G. R. e J. R. Setti [2011] Método para Caracterização e Classificação de Trechos Homogêneos Rodoviários. VII Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, **Anais...**, Foz do Iguaçu. ABCR.
- Al-Kaisy, A e S. Karjala [2008] Indicators of performance on two-lane rural highways: empirical investigation. **Transportation Research Record 2071**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, p. 87–97.
- Al-Kaisy, A. e Z. Freedman [2010] Estimating Performance on Two-Lane Highways: Case Study Validation of a New Methodology. **Transportation Research Board 2010 Annual Meeting CD-ROM**. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Al-Kaisy, A. e C. Durbin [2007] Estimating percent time spent following on two-lane highways: field evaluation of new methodologies. **Transportation Research Board 2007 Annual Meeting CD-ROM**. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Araújo, J. J. [2007] **Estudo do impacto de veículos pesados sobre a infra-estrutura rodoviária através de simulação microscópica de tráfego**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- Araújo, J. J. e J. R. Setti [2008] Análise do efeito do tráfego de veículos pesados sobre uma ponte através de simulação microscópica. In: **Transporte em Transformação XII**: Trabalhos vencedores do Prêmio CNT de Produção Acadêmica 2007. CNT/ANPET, p. 23–42.
- Arazoza, R. E. e D. S. McLeod [1993] Methodology to assess level of service on US-1 in the Florida Keys. **Transportation Research Record 1398**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 1-6.
- ARTESP [2002] **Relatório nº. 42**: Procedimentos Práticos para Cálculo da Capacidade Viária e Determinação do Nível de Serviço de Operação. Empresa de Apoio e Gerenciamento (EAG-ARTESP), Setor de Operações.
- Bessa Jr., J. E. [2009] **Caracterização do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples do estado de São Paulo**. 134p. Dissertação (Mestrado), EESC-USP, São Carlos.
- Bessa Jr., J. E.; F. A. A Lima; A. L. B. N. Cunha e J. R. Setti [2008] Calibração do modelo de desempenho do simulador Integration através de um algoritmo genético. XXII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, **Anais...**, Fortaleza-CE, 2008, CD-ROM.
- Bessa Jr., J. E. e J. R. Setti [2012] Relações fluxo-velocidade para rodovias de pista simples no Brasil. **Anais do XXVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Joinville-SC, CD-ROM.
- Bessa Jr., J. E. e J. R. Setti [2011a] Derivation of ATS and PTSF Functions for Two-lane, Rural Highways in Brazil. 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, **Procedia Social and Behavioral Sciences**, n. 16, p. 282–292, Stockholm, Sweden.
- Bessa Jr., J. E. e J. R. Setti [2011b] Comparação entre os simuladores CORSIM e TWOPAS para modelagem de rodovias de pista simples. **XXV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Belo Horizonte-MG, CD-ROM.
- Botma, H. [1986] Traffic operation on busy two-lane rural roads in the Netherlands. **Transportation Research Record 1091**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 126-131.
- Brilon, W. e F. Weiser [2006] Two-lane rural highways: the German experience. **Transportation Research Record 1988**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 38-47.
- Brodin, A. e A. Carlsson. [1986] **The VTI Traffic Simulation Model**. Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden, 1986.
- Catbagan, J. L. e H. Nakamura [2006] Evaluation of performance measures for two-lane expressways in Japan. **Transportation Research Record 1988**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 111-118.

- CNT [2012] **Pesquisa CNT de rodovias 2012: relatório gerencial**. Confederação Nacional do Transporte, SEST, SENAT. 408p. Brasília.
- Cohen, M. e A. Polus [2011] Estimating percent-time-spent-following on two-lane rural highways. **Transportation Research Part C**, v. 19, p. 1319–1325.
- Crocomo, M; E. V. Simões e A. C. B. Delbem [2004] Otimização Automática de Parâmetros de Sistemas Evolutivos de Acordo com a Aplicação. XXIV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, **Anais...** Los Alamitos : IEEE Computer Press, p. 1-10.
- Cunha, A. L. B. N. [2007] **Avaliação do impacto da medida de desempenho no equivalente veicular de caminhões**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- Cunha, A. L. B. N. e J. R. Setti [2006] Calibração do Modelo de Desempenho de Caminhões do CORSIM através de um Algoritmo Genético. **XX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Brasília-DF, 2006, CD-ROM.
- Cunha, A. L. B. N; M. L. Mon-Ma; J. J. Araújo; C. Y. Egami. e J. R. Setti [2005] Caracterização da frota de caminhões no sistema Anhanguera-Bandeirantes. **XIX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Recife-PE, 2005, CD-ROM.
- Dixon, M. P.; S. S. Sarepali e K. K. A. Young [2002] Field evaluation of Highway Capacity Manual 2000 analysis procedures for two-lane highways. **Transportation Research Record 1802**, TRB, National Research Council, Washington, D.C, p. 125-132.
- DNIT [2011] **Manual de Gerência de Pavimentos**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT [2006] **Manual de Estudos de Tráfego**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- Egami, C. Y. [2006] **Adaptação do HCM-2000 para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil**. 240p. Tese (Doutorado) EESC-USP, São Carlos.
- Egami, C. Y.; M. L. Mon-Ma; J. R. Setti e L. R. Rilett [2006] Automatic calibration of two-lane highway traffic simulation models using a genetic algorithm. **Proceedings of 9th International Conference – Applications of Advanced Technologies in Transportation**. American Society of Civil Engineers – ASCE. p. 510-515. Chicago, Illinois.
- FGSV [2005] **Handbuch zur Bemessung von Strassenverkehrsanlagen 2001** (HBS, German Highway Capacity Manual 2001). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Cologne.
- FHWA [2004] **Traffic Analysis Toolbox Volume III: guidelines for applying traffic microsimulation modeling software**. Federal Highway Administration (FHWA), jul 2004.
- Goldberg, D. E. [1989] **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Gross, D. e C. M. Harris [1985] **Fundamentals of queueing theory**. Second edition. John Wiley & Sons, Inc., USA, 1985, 585p.
- Hair Jr., J. F.; R. E. Anderson; R. L. Tatham, R. L. e W. C. Black [2005] **Análise multivariada de dados**. 5ª Ed. Bookman Companhia Editora. Porto Alegre, RS, 593p.
- Halati, A.; H. Lieu e S. Wlaker [1997] CORSIM – Corridor traffic simulation model. In: Traffic congestion and traffic safety in the 21st century: challenges, innovations and opportunities, 1997, Chicago. **Proceedings...** Chicago: American Society of Civil Engineering, p.570-576.
- Harwood, D. W.; A. D. May; I. B. Anderson; L. Leiman e A. R. Archilla [1999] **Capacity and quality of service of two-lane highways**. Final Report, NCHRP Project 3-55 (3). Midwest Research Institute, Kansas City, Mo.
- Harwood, D. W.; I. B. Potts; K. M. Bauer; J. A. Bonneson e L. Elefteriadou [2003] **Two-lane road analysis methodology in the Highway Capacity Manual**. Final Report, NCHRP Project 20-7 (160) - MRI Project 110252. National Cooperative Highway Research Program, TRB, Washington, DC, EUA. Unpublished version.

- Hellinga, B. [1998] Requirements for the validation and calibration of traffic simulation models. **Proceedings of Canadian Society for civil engineering 1998**. Annual conference held in Halifax, Nova Scotia, v. IVb, p. 211-222.
- Hoban, C. J.; R. J. Shepherd; G. J. Fawcett e G. K. Robinson [1991] **A model for simulating traffic on two-lane rural roads** – User guide and manual for TRARR Version 3.2, Victoria, Australia, AARB.
- Hollander, Y.; Liu, R. [2008] The principles of calibrating traffic microsimulation models. **Transportation**, Springer Science and Business Media, LLC, v. 35, p. 347-362. Published online: 15 January 2008.
- Ierusalimschy, R. [2006] **Programming in Lua**. 2a Edição, 308p., PUC-Rio de Janeiro, 2006.
- Kerali, H. G. R.; D. McMullen e J. B. Odoki [2000] **Volume two: Applications Guide**. The Highway Development and Management Series Collection, ISOHDM Technical Secretariat, School of Civil Engineering, The University of Birmingham.
- Kim, S.; W. Kim e L. R. Rilett [2005] Calibration of microsimulation models using nonparametric statistical techniques. **Transportation Research Record 1935**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 111-119.
- Kim, K. e R. L. Rilett [2001] Genetic algorithm based approach for calibration microscopic simulation models. **IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings**, Oakland, CA, USA, p. 698–704.
- Kondily, A. e L. Elefteriadou [2011] Modeling driver behavior at freeway–ramp merges. **Transportation Research Record 2249**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 29-37.
- Laval, J. A. [2006] A macroscopic theory of two-lane rural roads. **Transportation Research Part B**, v. 40, p. 937–944.
- Li, J e S. S. Washburn [2014] Improved operational performance assessment for two-lane highway facilities. **Journal of Transportation Engineering**. v. 140, n. 6.
- Llorca, C.; A. T. Moreno; A. Lenorzer; J. Casas e A. Garcia [2014] Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. In Press.
- Lobo, A.; M. A. P. Jacques; C. M. Rodrigues e A. Couto [2011] Free-gap evaluation for two-lane rural highways. **Transportation Research Record 2223**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 9–17.
- Luttinen, R. T. [2006]. Capacity and Level-of-Service Estimation in Finland. **Fifth International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service**. Yokohama, Japão.
- Luttinen, R. T. [2000] Level of service on Finnish two-lane highways. **Transportation Research Circular E-C018: Fourth International Symposium on Highway Capacity**. TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 175-187.
- Ma, T. e B. Abdulhai [2002] Genetic Algorithm-based Optimization Approach and generic tool for calibration traffic microscopic simulation parameters. **Transportation Research Record 1800**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 6-15.
- Ma, J.; H. Dong e H. M. Zhang [2007] Calibration of microsimulation with heuristic optimization methods. **Transportation Research Record 1999**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 208-217.
- Maldonado, M. O.; M. Herz e J. Galarraga [2011] Modelacion de operación en carreteras argentinas y recomendaciones de ajustes al analisis unidireccional del manual de capacidad HCM. **Anais do XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Belo Horizonte-BH, CD-ROM.
- McLean, J. R. [1989] **Two-lane highway traffic operations** – Theory and practice. Transportation Studies, v.11. Gordon and Preach Science Publishers, Amsterdam.
- McTrans [2010] **CORSIM – User’s Guide**. TSIS Version 6.2, McTrans, University of Florida.
- Medeiros, A. L.; M. M. Castro Neto; C. F. G. Loureiro e J. E. Bessa Jr. [2013] Calibração de redes viárias urbanas microssimuladas com o uso de algoritmos genéticos. XXVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, **Anais...**, Belém-PA, 2013.

- Moreno, A.T.; T. Sayed e A. Garcia [2014] Field Evaluation of Traffic Performance Measures for Two-Lane Highways in Spain. **Transportation Research Board 2014 Annual Meeting CD-ROM**. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Morral, J. F. e A. Werner [1990] Measuring level of service of two-lane highways by overtakings. **Transportation Research Record 1287**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 62-69.
- Mon-Ma, M. L. [2008] **Adaptação do HCM-2000 para rodovias de pista simples com faixas adicionais típicas do Estado de São Paulo**. 162p. Tese (Doutorado) EESC-USP, São Carlos.
- Nunes, D. F.; M. M. P. Ribeiro; R. B. El-Hage; G. Frasnelli e J. L. Fernandes Jr. [2010] Análise econômica da influência de rampas sobre os custos totais da modalidade rodoviária. Coninfra 2010 - 4º congresso de infraestrutura de transportes. **Anais...**, São Paulo-SP.
- ODOT [2014] **Modeling performance indicators on two-lane rural highways: the Oregon experience**. Oregon Department of Transportation. Transportation Development Division. Facility Analysis and Simulation Team.
- Park, B. e H. Qi [2005] Development and evaluation of a procedure for the calibration of simulation models. **Transportation Research Record 1934**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 208-217.
- Pitombo, C. S. e E. Kawamoto [2005] Aplicação de técnicas de análise multivariada de dados em um estudo exploratório da influência do uso do solo nas escolhas de padrões de encadeamento de viagens. **Anais do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Recife-PE, CD-ROM.
- Polus, A. e M. Cohen [2009] Theoretical and empirical relationships for the quality of flow and for a new level of service on two-lane highways. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, v. 135, n. 6, p. 380-385.
- Pursula, M. [1995] Approximation of percentage time delay with local measurements. **Transportation Research Record 1484**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 58-65.
- Pursula, M. e A. Enberg [1991] Characteristics and level-of-service estimation of traffic flow on two-lane rural roads in Finland. **Transportation Research Record 1320**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 135-143.
- Romana, M. G. [1994]. **Evalución práctica de niveles de servicio em carreteras convencionales de dos carriles em España**. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Civil – Transportes, de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Romana, M. G e M. Núñez [2011] Proposal of an Alternative Model for Speed-Flow Relationship in Two-Lane Highways. 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, **Procedia Social and Behavioral Sciences**, n. 16, p. 832-839, Stockholm, Sweden.
- Setti, J. R. [2009] *Highway Capacity Manual* ou Manual de Capacidade Viária? **Anais do 6º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C 2009**, Florianópolis, SC.
- Schultz, G. G. e L. R. Rilett [2004] Analysis of distribution and calibration of car-following sensitivity parameters in microscopic traffic simulation models. **Transportation Research Record**, v. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 41-51.
- Schneider, A. [2010] **GPS Visualizer**. Disponível em: <www.gpsvisualizer.com> (Acesso em: dez 2014).
- Tapani, A. [2005] Versatile Model for Simulation of Rural Road Traffic. **Transportation Research Record 1934**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 169-178.
- TCU [2008] **Acórdão 2104/2008 Plenário, processo nº 016.189/2008-9**. Tribunal de Contas da União. Disponível em: <http://portal2.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/detalhes_noticias?noticia=777746> Acesso em: 7 Jul 2009.
- Tomassini, M. [1995] A survey of genetic algorithms. **Annual Reviews of Computational Physics 1995**, World Scientific, p. 87-118. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.55.5988>> (Acesso em: 20 Nov 2008).
- TRB [2010] **Highway Capacity Manual 2010**. Transportation Research Board. Washington D.C.
- TRB [2000] **Highway Capacity Manual 2000**. Transportation Research Board. Washington D.C.

- TRB [1985] **Highway Capacity Manual – Special Report 209**. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Triola, M. F. [2005] **Introdução à Estatística**, 9ª edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ, 656 p.
- TKK [2011] **HUTSIM – A microscopic traffic simulator**. Laboratory of Transportation Engineering, Helsinki University of Technology. Disponível em: <<http://www.tkk.fi/Units/Transportation/ITS/ENG/hutsim.html>> Acesso em: 10 Mai 2011.
- Utimura, F. S.; J. R. Setti, J. R. e M. L. Mon-Ma [2007] Verificação da acurácia de estimativas do nível de serviço em rodovias de pista simples no estado de São Paulo. XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**, 2007.
- Van As, C. [2003] **The development of an analysis method for the determination of level of service of two-lane undivided highways in South Africa**. Project Summary. South African National Roads Agency Limited.
- Virkler, M. R. e D. L. Guell [1991] Passing demand on lower volume two-lane highways. **Proceedings of the International Symposium on Highway Capacity**. p. 429–438. Karlsruhe.
- Washburn, S. e J. Li [2010] **Development of a Simulation Program for Two-Lane Highway Analysis**. Center for Multimodal Solutions for Congestion Mitigation (CMS), CMS Project Number: 2008-002, Gainesville, FL, EUA.
- Watanatada, T; A. Dhareshwar e P. R. S. Resende-Lima [1987] **The Highway Design and Maintenance Standard Model Volume II, Vehicle Speeds and Operating Costs**: Models for Road Planning and Management. World Bank, Transportation Department, Washington, D. C., EUA, 460p.
- Yu, Q. e S. Washburn [2009] **Operational performance assessment for two-lane highway facilities**. Journal of Transportation Engineering, ASCE, v. 135, n. 4, p. 197-205.

Apêndice A: Parâmetros dos modelos de tráfego

A.1. Relações fluxo-velocidade (modelo linear)

Tabela A.1: Parâmetros do modelo linear da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 80$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			$20 - 40$				≤ 20			$20 - 40$		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	77,84	-0,020	0,76	77,38	-0,020	0,76	≤ 50	76,33	-0,021	0,76	74,28	-0,027	0,77
100 – 150	-	-	-	62,25	-0,014	0,70	100 – 150	-	-	-	58,55	-0,031	0,75
150 – 200	68,08	-0,020	0,70	-	-	-	150 – 200	68,45	-0,025	0,82	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			$20 - 40$				≤ 20			$20 - 40$		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	76,19	-0,020	0,78	75,04	-0,024	0,75	≤ 50	75,23	-0,020	0,76	70,19	-0,025	0,73
100 – 150	-	-	-	62,94	-0,029	0,70	100 – 150	-	-	-	61,45	-0,037	0,77
150 – 200	65,17	-0,019	0,75	-	-	-	150 – 200	69,25	-0,027	0,82	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			$20 - 40$				≤ 20			$20 - 40$		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	76,55	-0,021	0,77	75,44	-0,026	0,76	≤ 50	73,55	-0,019	0,75	70,50	-0,028	0,76
100 – 150	-	-	-	59,43	-0,030	0,77	100 – 150	-	-	-	58,40	-0,033	0,82
150 – 200	65,53	-0,023	0,80	-	-	-	150 – 200	68,29	-0,027	0,84	-	-	-

Tabela A.2: Parâmetros do modelo linear da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 90$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	85,50	-0,021	0,75	85,23	-0,022	0,76	≤ 50	87,00	-0,026	0,80	79,97	-0,028	0,76
100 – 150	-	-	-	68,22	-0,017	0,71	100 – 150	-	-	-	62,51	-0,025	0,65
150 – 200	75,15	-0,023	0,65	-	-	-	150 – 200	73,58	-0,029	0,82	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	85,81	-0,022	0,76	86,05	-0,029	0,77	≤ 50	82,08	-0,021	0,76	73,82	-0,024	0,66
100 – 150	-	-	-	68,31	-0,030	0,74	100 – 150	-	-	-	63,55	-0,032	0,79
150 – 200	70,96	-0,021	0,74	-	-	-	150 – 200	69,74	-0,026	0,85	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	85,12	-0,023	0,77	82,84	-0,029	0,77	≤ 50	85,53	-0,025	0,77	81,09	-0,034	0,79
100 – 150	-	-	-	63,76	-0,025	0,69	100 – 150	-	-	-	62,98	-0,032	0,80
150 – 200	69,34	-0,024	0,79	-	-	-	150 – 200	73,80	-0,030	0,86	-	-	-

Tabela A.3: Parâmetros do modelo linear da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 100$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	93,40	-0,023	0,74	96,56	-0,023	0,70	≤ 50	97,22	-0,029	0,79	91,69	-0,037	0,79
100 – 150	-	-	-	74,95	-0,017	0,71	100 – 150	-	-	-	69,86	-0,036	0,77
150 – 200	86,48	-0,023	0,70	-	-	-	150 – 200	75,87	-0,031	0,82	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	89,00	-0,019	0,74	92,73	-0,031	0,74	≤ 50	92,62	-0,025	0,75	81,51	-0,029	0,69
100 – 150	-	-	-	68,83	-0,026	0,68	100 – 150	-	-	-	67,71	-0,036	0,74
150 – 200	74,82	-0,022	0,74	-	-	-	150 – 200	71,04	-0,030	0,87	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	95,39	-0,026	0,76	93,14	-0,032	0,75	≤ 50	89,00	-0,022	0,73	92,09	-0,041	0,75
100 – 150	-	-	-	69,49	-0,032	0,71	100 – 150	-	-	-	60,50	-0,030	0,79
150 – 200	80,97	-0,034	0,77	-	-	-	150 – 200	79,65	-0,036	0,85	-	-	-

A.2. Relações fluxo-velocidade (modelo côncavo)

Tabela A.4: Parâmetros do modelo côncavo da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 80$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	77,84	-0,685	0,84	77,38	-0,675	0,83	≤ 50	76,33	-0,721	0,85	74,28	-0,844	0,85
100 – 150	-	-	-	62,25	-0,481	0,78	100 – 150	-	-	-	58,55	-0,727	0,81
150 – 200	68,08	-0,626	0,80	-	-	-	150 – 200	68,45	-0,818	0,90	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	76,19	-0,694	0,86	75,04	-0,761	0,84	≤ 50	75,23	-0,668	0,84	70,19	-0,781	0,80
100 – 150	-	-	-	62,94	-0,727	0,78	100 – 150	-	-	-	61,45	-0,939	0,87
150 – 200	65,17	-0,606	0,84	-	-	-	150 – 200	69,25	-0,862	0,91	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	76,55	-0,697	0,84	75,44	-0,832	0,85	≤ 50	73,55	-0,628	0,82	70,50	-0,841	0,83
100 – 150	-	-	-	59,43	-0,752	0,84	100 – 150	-	-	-	58,40	-0,821	0,88
150 – 200	65,53	-0,682	0,87	-	-	-	150 – 200	68,29	-0,887	0,92	-	-	-

Tabela A.5: Parâmetros do modelo côncavo da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 90$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	85,50	-0,728	0,82	85,23	-0,748	0,83	≤ 50	87,00	-0,870	0,87	79,97	-0,877	0,83
100 – 150	-	-	-	68,22	-0,578	0,80	100 – 150	-	-	-	62,51	-0,692	0,77
150 – 200	75,15	-0,730	0,78	-	-	-	150 – 200	73,58	-0,893	0,89	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	85,81	-0,768	0,83	86,05	-0,934	0,86	≤ 50	82,08	-0,702	0,83	73,82	-0,729	0,74
100 – 150	-	-	-	68,31	-0,803	0,83	100 – 150	-	-	-	63,55	-0,835	0,87
150 – 200	70,96	-0,670	0,82	-	-	-	150 – 200	69,74	-0,806	0,92	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	85,12	-0,762	0,85	82,84	-0,926	0,85	≤ 50	85,53	-0,833	0,85	81,09	-1,040	0,86
100 – 150	-	-	-	63,76	-0,667	0,76	100 – 150	-	-	-	62,98	-0,845	0,87
150 – 200	69,34	-0,716	0,86	-	-	-	150 – 200	73,80	-1,003	0,93	-	-	-

Tabela A.6: Parâmetros do modelo côncavo da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 100$ km/h

$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	93,40	-0,751	0,81	96,56	-0,808	0,79	≤ 50	97,22	-0,976	0,87	91,69	-1,153	0,87
100 – 150	-	-	-	74,95	-0,612	0,81	100 – 150	-	-	-	69,86	-0,927	0,83
150 – 200	86,48	-0,761	0,79	-	-	-	150 – 200	75,87	-0,949	0,91	-	-	-
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	89,00	-0,635	0,77	92,73	-0,971	0,83	≤ 50	92,62	-0,834	0,82	81,51	-0,891	0,77
100 – 150	-	-	-	68,83	-0,696	0,75	100 – 150	-	-	-	67,71	-0,970	0,85
150 – 200	74,82	-0,707	0,83	-	-	-	150 – 200	71,04	-0,885	0,92	-	-	-
$P_{hv} = 20\%$							$P_{hv} = 50\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	95,39	-0,893	0,84	93,14	-1,016	0,85	≤ 50	89,00	-0,731	0,79	92,09	-1,266	0,84
100 – 150	-	-	-	69,49	-0,839	0,80	100 – 150	-	-	-	60,50	-0,764	0,85
150 – 200	80,97	-1,013	0,88	-	-	-	150 – 200	79,65	-1,190	0,93	-	-	-

A.3. Relações entre o fluxo e a densidade de veículos em pelotões

Tabela A.7: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a densidade de veículos em pelotões com $FFS_d = 70$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000143	0,0000137	≤ 50	0,0000138	0,0000153
100 - 150	-	0,0000157	100 - 150	-	0,0000228
150 - 200	0,0000150	-	150 - 200	0,0000148	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000140	0,0000143	≤ 50	0,0000143	0,0000143
100 - 150	-	0,0000207	100 - 150	-	0,0000192
150 - 200	0,0000151	-	150 - 200	0,0000131	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000140	0,0000150	≤ 50	0,0000143	0,0000127
100 - 150	-	0,0000240	100 - 150	-	0,0000144
150 - 200	0,0000158	-	150 - 200	0,0000125	-

Tabela A.8: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a densidade de veículos em pelotões com $FFS_d = 80$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000122	0,0000123	≤ 50	0,0000121	0,0000137
100 - 150	-	0,0000145	100 - 150	-	0,0000173
150 - 200	0,0000136	-	150 - 200	0,0000134	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000120	0,0000140	≤ 50	0,0000129	0,0000137
100 - 150	-	0,0000194	100 - 150	-	0,0000185
150 - 200	0,0000148	-	150 - 200	0,0000127	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000123	0,0000139	≤ 50	0,0000125	0,0000115
100 - 150	-	0,0000186	100 - 150	-	0,0000172
150 - 200	0,0000149	-	150 - 200	0,0000113	-

Tabela A.9: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a densidade de veículos em pelotões com $FFS_d = 90$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000109	0,0000110	≤ 50	0,0000113	0,0000130
100 - 150	-	0,0000133	100 - 150	-	0,0000204
150 - 200	0,0000126	-	150 - 200	0,0000138	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000110	0,0000121	≤ 50	0,0000111	0,0000117
100 - 150	-	0,0000181	100 - 150	-	0,0000181
150 - 200	0,0000139	-	150 - 200	0,0000127	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000112	0,0000130	≤ 50	0,0000112	0,0000105
100 - 150	-	0,0000191	100 - 150	-	0,0000179
150 - 200	0,0000138	-	150 - 200	0,0000116	-

Tabela A.10: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a densidade de veículos em pelotões com $FFS_d = 100$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000099	0,0000098	≤ 50	0,0000095	0,0000123
100 - 150	-	0,0000133	100 - 150	-	0,0000164
150 - 200	0,0000103	-	150 - 200	0,0000125	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000100	0,0000106	≤ 50	0,0000107	0,0000100
100 - 150	-	0,0000151	100 - 150	-	0,0000172
150 - 200	0,0000137	-	150 - 200	0,0000117	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,0000100	0,0000112	≤ 50	0,0000097	0,0000112
100 - 150	-	0,0000191	100 - 150	-	0,0000174
150 - 200	0,0000133	-	150 - 200	0,0000110	-

A.4. Relações entre o fluxo e a porcentagem de veículos em pelotões

Tabela A.11: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos em pelotões com $FFS_d = 70$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	10,79	-0,192	10,54	-0,190	≤ 50	10,00	-0,179	7,42	-0,122
100 – 150	-	-	17,24	-0,276	100 – 150	-	-	6,10	-0,077
150 – 200	7,96	-0,133	-	-	150 – 200	6,47	-0,094	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	12,67	-0,220	9,39	-0,165	≤ 50	9,27	-0,171	7,97	-0,134
100 – 150	-	-	11,00	-0,199	100 – 150	-	-	5,43	-0,054
150 – 200	10,70	-0,190	-	-	150 – 200	5,17	-0,051	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	11,88	-0,210	6,98	-0,111	≤ 50	8,98	-0,160	7,17	-0,109
100 – 150	-	-	4,88	-0,039	100 – 150	-	-	5,35	-0,051
150 – 200	6,07	-0,085	-	-	150 – 200	5,22	-0,047	-	-

Tabela A.12: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos em pelotões com $FFS_d = 80$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		$20 - 40$			≤ 20		$20 - 40$	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	14,05	-0,239	11,33	-0,208	≤ 50	8,43	-0,147	7,12	-0,118
100 – 150	-	-	9,00	-0,168	100 – 150	-	-	5,45	-0,054
150 – 200	6,10	-0,093	-	-	150 – 200	6,16	-0,080	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		$20 - 40$			≤ 20		$20 - 40$	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	9,09	-0,157	9,36	-0,173	≤ 50	9,66	-0,170	9,59	-0,163
100 – 150	-	-	5,30	-0,060	100 – 150	-	-	5,42	-0,054
150 – 200	8,68	-0,143	-	-	150 – 200	4,94	-0,045	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		$20 - 40$			≤ 20		$20 - 40$	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	9,27	-0,163	9,39	-0,164	≤ 50	13,08	-0,222	6,39	-0,090
100 – 150	-	-	5,83	-0,071	100 – 150	-	-	5,28	-0,046
150 – 200	8,82	-0,149	-	-	150 – 200	5,74	-0,062	-	-

Tabela A.13: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos em pelotões com $FFS_d = 90$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		$20 - 40$			≤ 20		$20 - 40$	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	13,69	-0,231	12,58	-0,215	≤ 50	9,40	-0,169	7,34	-0,119
100 – 150	-	-	9,75	-0,170	100 – 150	-	-	6,11	-0,078
150 – 200	9,86	-0,174	-	-	150 – 200	6,30	-0,089	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		$20 - 40$			≤ 20		$20 - 40$	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	12,80	-0,219	10,11	-0,180	≤ 50	8,11	-0,141	7,24	-0,114
100 – 150	-	-	10,89	-0,188	100 – 150	-	-	5,93	-0,071
150 – 200	15,82	-0,253	-	-	150 – 200	6,03	-0,074	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		$20 - 40$			≤ 20		$20 - 40$	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	12,97	-0,226	21,36	-0,307	≤ 50	8,48	-0,151	6,28	-0,083
100 – 150	-	-	6,50	-0,092	100 – 150	-	-	5,41	-0,051
150 – 200	5,77	-0,073	-	-	150 – 200	6,03	-0,071	-	-

Tabela A.14: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos em pelotões com $FFS_d = 100$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	11,85	-0,201	9,27	-0,173	≤ 50	7,95	-0,137	7,56	-0,119
100 – 150	-	-	17,14	-0,265	100 – 150	-	-	6,30	-0,085
150 – 200	8,35	-0,138	-	-	150 – 200	7,02	-0,102	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	9,57	-0,170	10,94	-0,187	≤ 50	8,98	-0,159	5,31	-0,059
100 – 150	-	-	7,02	-0,107	100 – 150	-	-	5,47	-0,055
150 – 200	8,01	-0,130	-	-	150 – 200	5,21	-0,047	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	9,46	-0,164	10,71	-0,192	≤ 50	8,03	-0,149	7,04	-0,103
100 – 150	-	-	7,05	-0,117	100 – 150	-	-	5,93	-0,065
150 – 200	7,93	-0,126	-	-	150 – 200	5,44	-0,050	-	-

A.5. Relações entre o fluxo e a porcentagem de veículos retidos

Tabela A.15: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos retidos com $FFS_d = 70$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,79	-0,057	6,04	-0,064	≤ 50	4,75	-0,021	6,00	-0,061
100 – 150	-	-	6,09	-0,053	100 – 150	-	-	4,86	-0,015
150 – 200	5,04	-0,023	-	-	150 – 200	5,22	-0,032	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,03	-0,034	5,84	-0,056	≤ 50	4,88	-0,026	4,99	-0,028
100 – 150	-	-	5,14	-0,023	100 – 150	-	-	5,17	-0,026
150 – 200	5,06	-0,027	-	-	150 – 200	5,02	-0,025	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,12	-0,037	5,26	-0,036	≤ 50	5,29	-0,037	4,85	-0,020
100 – 150	-	-	5,22	-0,028	100 – 150	-	-	4,93	-0,018
150 – 200	5,09	-0,028	-	-	150 – 200	4,95	-0,023	-	-

Tabela A.16: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos retidos com $FFS_d = 80$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,70	-0,056	5,79	-0,057	≤ 50	4,86	-0,027	4,62	-0,013
100 – 150	-	-	6,07	-0,053	100 – 150	-	-	4,75	-0,010
150 – 200	4,79	-0,014	-	-	150 – 200	5,43	-0,038	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,11	-0,035	5,36	-0,039	≤ 50	5,09	-0,032	4,73	-0,017
100 – 150	-	-	4,78	-0,012	100 – 150	-	-	4,99	-0,020
150 – 200	5,17	-0,028	-	-	150 – 200	5,14	-0,030	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,11	-0,034	5,71	-0,053	≤ 50	5,15	-0,035	5,11	-0,030
100 – 150	-	-	5,05	-0,021	100 – 150	-	-	5,14	-0,024
150 – 200	5,02	-0,025	-	-	150 – 200	4,88	-0,021	-	-

Tabela A.17: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos retidos com $FFS_d = 90$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,68	-0,055	6,72	-0,082	≤ 50	5,03	-0,031	5,24	-0,034
100 – 150	-	-	6,13	-0,054	100 – 150	-	-	4,77	-0,011
150 – 200	5,11	-0,022	-	-	150 – 200	4,79	-0,017	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,23	-0,039	5,25	-0,039	≤ 50	4,80	-0,024	4,89	-0,022
100 – 150	-	-	5,16	-0,025	100 – 150	-	-	4,92	-0,016
150 – 200	5,34	-0,033	-	-	150 – 200	4,99	-0,024	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,36	-0,044	4,99	-0,028	≤ 50	5,45	-0,045	5,17	-0,031
100 – 150	-	-	4,78	-0,012	100 – 150	-	-	4,72	-0,010
150 – 200	5,07	-0,027	-	-	150 – 200	4,86	-0,019	-	-

Tabela A.18: Parâmetros do modelo entre o fluxo e a porcentagem de veículos retidos com $FFS_d = 100$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	7,80	-0,105	6,98	-0,087	≤ 50	4,55	-0,013	5,00	-0,024
100 – 150	-	-	5,90	-0,047	100 – 150	-	-	5,19	-0,026
150 – 200	4,93	-0,017	-	-	150 – 200	5,55	-0,043	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	6,08	-0,062	5,52	-0,045	≤ 50	4,94	-0,025	4,65	-0,015
100 – 150	-	-	5,25	-0,026	100 – 150	-	-	4,65	-0,007
150 – 200	5,23	-0,030	-	-	150 – 200	4,76	-0,017	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	5,55	-0,046	5,07	-0,028	≤ 50	4,41	-0,010	5,13	-0,028
100 – 150	-	-	5,16	-0,024	100 – 150	-	-	5,05	-0,022
150 – 200	5,13	-0,028	-	-	150 – 200	4,94	-0,022	-	-

A.6. Relações entre o fluxo e o número médio de veículos em pelotões

Tabela A.19: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos em pelotões com $FFS_d = 70$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00725	0,00761	≤ 50	0,00620	0,00598
100 - 150	-	0,00271	100 - 150	-	0,00352
150 - 200	0,00431	-	150 - 200	0,00451	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00722	0,00790	≤ 50	0,00577	0,00548
100 - 150	-	0,00308	100 - 150	-	0,00332
150 - 200	0,00541	-	150 - 200	0,00381	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00708	0,00607	≤ 50	0,00558	0,00517
100 - 150	-	0,00332	100 - 150	-	0,00306
150 - 200	0,00544	-	150 - 200	0,00344	-

Tabela A.20: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos em pelotões com $FFS_d = 80$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00724	0,00732	≤ 50	0,00665	0,00571
100 - 150	-	0,00280	100 - 150	-	0,00318
150 - 200	0,00425	-	150 - 200	0,00442	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00709	0,00756	≤ 50	0,00562	0,00533
100 - 150	-	0,00337	100 - 150	-	0,00336
150 - 200	0,00561	-	150 - 200	0,00363	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00730	0,00680	≤ 50	0,00532	0,00493
100 - 150	-	0,00315	100 - 150	-	0,00322
150 - 200	0,00560	-	150 - 200	0,00316	-

Tabela A.21: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos em pelotões com $FFS_d = 90$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00752	0,00745	≤ 50	0,00629	0,00555
100 - 150	-	0,00282	100 - 150	-	0,00288
150 - 200	0,00447	-	150 - 200	0,00448	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00687	0,00743	≤ 50	0,00540	0,00506
100 - 150	-	0,00298	100 - 150	-	0,00301
150 - 200	0,00598	-	150 - 200	0,00378	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00665	0,00627	≤ 50	0,00523	0,00453
100 - 150	-	0,00297	100 - 150	-	0,00286
150 - 200	0,00493	-	150 - 200	0,00325	-

Tabela A.22: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos em pelotões com $FFS_d = 100$ km/h

$P_{hv} = 0\%$			$P_{hv} = 30\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00780	0,00690	≤ 50	0,00599	0,00497
100 - 150	-	0,00279	100 - 150	-	0,00263
150 - 200	0,00449	-	150 - 200	0,00441	-
$P_{hv} = 10\%$			$P_{hv} = 40\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00689	0,00699	≤ 50	0,00543	0,00592
100 - 150	-	0,00304	100 - 150	-	0,00304
150 - 200	0,00582	-	150 - 200	0,00359	-
$P_{hv} = 20\%$			$P_{hv} = 50\%$		
KU (graus/km)	RF (m/km)		KU (graus/km)	RF (m/km)	
	≤ 20	20 - 40		≤ 20	20 - 40
	a	a		a	a
≤ 50	0,00631	0,00728	≤ 50	0,00518	0,00441
100 - 150	-	0,00330	100 - 150	-	0,00304
150 - 200	0,00513	-	150 - 200	0,00333	-

A.7. Relações entre o fluxo e número médio de veículos fora dos pelotões

Tabela A.23: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos fora dos pelotões com $FFS_d = 70$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	21,19	-0,352	24,05	-0,368	≤ 50	14,91	-0,292	21,08	-0,349
100 – 150	-	-	25,81	-0,377	100 – 150	-	-	24,24	-0,370
150 – 200	26,11	-0,380	-	-	150 – 200	17,19	-0,317	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	18,91	-0,335	24,49	-0,370	≤ 50	14,49	-0,292	29,97	-0,400
100 – 150	-	-	17,95	-0,326	100 – 150	-	-	16,92	-0,314
150 – 200	29,99	-0,402	-	-	150 – 200	25,01	-0,375	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	23,17	-0,364	23,19	-0,362	≤ 50	15,44	-0,300	30,45	-0,403
100 – 150	-	-	23,00	-0,363	100 – 150	-	-	30,56	-0,403
150 – 200	14,42	-0,295	-	-	150 – 200	17,67	-0,319	-	-

Tabela A.24: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos fora dos pelotões com $FFS_d = 80$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	23,60	-0,364	32,28	-0,410	≤ 50	22,32	-0,355	29,09	-0,394
100 – 150	-	-	26,48	-0,379	100 – 150	-	-	44,99	-0,458
150 – 200	26,60	-0,383	-	-	150 – 200	14,15	-0,288	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	27,91	-0,388	26,88	-0,382	≤ 50	28,04	-0,387	38,18	-0,435
100 – 150	-	-	26,47	-0,377	100 – 150	-	-	20,25	-0,344
150 – 200	24,99	-0,374	-	-	150 – 200	26,12	-0,377	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	31,96	-0,410	32,53	-0,412	≤ 50	19,37	-0,333	34,09	-0,419
100 – 150	-	-	32,74	-0,412	100 – 150	-	-	34,93	-0,424
150 – 200	24,38	-0,370	-	-	150 – 200	21,92	-0,350	-	-

Tabela A.25: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos fora dos pelotões com $FFS_d = 90$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	25,74	-0,373	40,36	-0,439	≤ 50	26,11	-0,378	28,24	-0,392
100 – 150	-	-	41,30	-0,445	100 – 150	-	-	41,48	-0,448
150 – 200	26,36	-0,377	-	-	150 – 200	27,55	-0,385	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	30,00	-0,395	33,77	-0,415	≤ 50	21,64	-0,351	36,60	-0,429
100 – 150	-	-	31,86	-0,405	100 – 150	-	-	33,39	-0,416
150 – 200	30,92	-0,401	-	-	150 – 200	22,97	-0,359	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	32,18	-0,407	42,49	-0,448	≤ 50	24,70	-0,366	45,46	-0,460
100 – 150	-	-	28,26	-0,391	100 – 150	-	-	41,97	-0,448
150 – 200	27,41	-0,386	-	-	150 – 200	26,67	-0,377	-	-

Tabela A.26: Parâmetros do modelo entre o fluxo e o número médio de veículos fora dos pelotões com $FFS_d = 100$ km/h

$P_{hv} = 0\%$					$P_{hv} = 30\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	28,22	-0,386	36,64	-0,426	≤ 50	43,80	-0,449	34,60	-0,417
100 – 150	-	-	24,65	-0,365	100 – 150	-	-	40,61	-0,445
150 – 200	30,08	-0,395	-	-	150 – 200	34,60	-0,416	-	-
$P_{hv} = 10\%$					$P_{hv} = 40\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	31,63	-0,402	39,20	-0,435	≤ 50	27,43	-0,380	53,31	-0,486
100 – 150	-	-	38,01	-0,431	100 – 150	-	-	58,58	-0,496
150 – 200	27,71	-0,382	-	-	150 – 200	20,47	-0,340	-	-
$P_{hv} = 20\%$					$P_{hv} = 50\%$				
KU (graus/km)	RF (m/km)				KU (graus/km)	RF (m/km)			
	≤ 20		20 - 40			≤ 20		20 - 40	
	a	b	a	b		a	b	a	b
≤ 50	45,11	-0,458	45,19	-0,458	≤ 50	34,16	-0,415	54,17	-0,485
100 – 150	-	-	34,80	-0,419	100 – 150	-	-	54,13	-0,486
150 – 200	40,85	-0,442	-	-	150 – 200	30,90	-0,400	-	-