GUSTAVO RIENTE DE ANDRADE

**CAPACIDADE E RELAÇÃO
FLUXO-VELOCIDADE EM
AUTOESTRADAS E RODOVIAS
DE PISTA DUPLA PAULISTAS**

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

Orientador: Prof. Assoc. José Reynaldo A. Setti

São Carlos

2012

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

A553c Andrade, Gustavo Riente de.
Capacidade e relação fluxo-velocidade em autoestradas e
rodovias de pista dupla paulistas. / Gustavo Riente de
Andrade ; orientador Jose Reynaldo Anselmo Setti . São
Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes)-- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Rodovias. 2. Rodovias de pista dupla. 3.
Autoestradas. 4. Relação fluxo-velocidade. 5. Capacidade.
6. HCM. I. Título.

Escolha um trabalho que goste, e não precisará trabalhar nem um dia em sua vida.

Confúcio (孔夫子), pensador chinês

AGRADECIMENTOS

Principio esta seção agradecendo ao prof. José Setti, pelos conselhos e pela dedicação em construir o ambiente no qual este trabalho pode ser desenvolvido. À minha mãe, Regina Riente, que me incentivou a seguir meu caminho, e me encontrou quando eu precisei. Ao meu pai, Silvestre de Andrade, grande companheiro e mestre, guiando cada passo. À Karla Cristina, que se dispôs a viver tudo isso comigo, em todos os momentos.

Prossigo, reconhecendo a importância de todos que me ajudaram a construir meu caminho profissional até aqui. À UFMG, que lançou os alicerces da minha formação como engenheiro. Ao Grupo Tectran, minha primeira escola de engenharia de transportes, em especial aos meus mestres e mentores prof. Dr. Ramon Victor Cesar, Eduardo Coelho e Maurício Aguiar. Por fim, ao Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, em especial aos professores Antônio Néelson e Coca Ferraz, pelos ensinamentos.

Avanço, agradecendo a todos aqueles que deram suporte direto a este trabalho. Ao apoio financeiro do CNPq, através de uma bolsa de mestrado. Ao programa de concessão de rodovias do estado de São Paulo, em especial aos amigos da ARTERP e das concessionárias CCR RodoAnel, CCR ViaOeste e CCR AutoBan, que produziram e cederam os dados de tráfego essenciais a este estudo. Ao prof. Ricardo Ernesto Schaal, pelos ensinamentos no uso do GPS e suas possibilidades. Aos colegas José Elievam e André Cunha, pela experiência compartilhada e amizade. À prof.^a Lily Elefteriadou, da Universidade da Flórida, e ao prof. Roger Roess, do Instituto Politécnico de Nova York, pelos importantes conselhos dados e a pela extraordinária boa vontade em cedê-los.

Encerro agradecendo aos funcionários do SST, aos amigos feitos em 2009 e a todos que fizeram deste tempo de mestrado um momento muito especial da minha vida.

RESUMO

ANDRADE, G. R. *Capacidade e relação fluxo-velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas*. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Neste trabalho, calibra-se um modelo que descreva a relação fluxo-velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla, considerando as recomendações tecidas pelos autores envolvidos na elaboração do modelo do *Highway Capacity Manual* – HCM 2010. Para tanto, foi utilizada uma amostra de 788.122 observações, coletadas por 25 estações em quatro rodovias paulistas: SP-348, SP-021, SP-280 e SP 270. A análise dos dados mostrou que, conforme preconizado pelo HCM 2010, existe um intervalo de fluxos no qual a velocidade se mantém constante, o que corresponde à velocidade de fluxo livre. Em seguida, verificou-se que a classificação do HCM 2010, entre autoestradas e rodovias de pista dupla, não se mostra adequada para a amostra estudada, tendo sido indicada a divisão entre rodovias urbanas e rurais. Para esses grupos, foram propostos valores representativos para a capacidade e calibrada a relação fluxo-velocidade. A comparação entre os dois conjuntos de curvas produzidos mostrou que a velocidade média da corrente de tráfego nas rodovias urbanas apresenta uma queda mais precoce e acentuada do que a observada em rodovias rurais. Além disso, os valores estimados para a capacidade C e para a velocidade na capacidade CS para rodovias urbanas são inferiores aos estimados para rodovias rurais. Em contraste com o modelo do HCM 2010, a principal diferença reside em valores significativamente inferiores para BP , o fluxo a partir do qual se nota um declínio da velocidade em função do aumento da densidade da corrente de tráfego. Outro ponto de destaque é que, embora os valores da capacidade sejam parecidos entre o modelo do HCM 2010 e o calibrado, a velocidade na capacidade CS é superior nas rodovias paulistas.

Palavras-chaves: rodovias; autoestradas; rodovias de pista dupla; relação fluxo-velocidade; capacidade; HCM.

ABSTRACT

ANDRADE, G. R. *Capacity and speed-flow relationship for freeways and multilane highways in the state of São Paulo*. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

This work presents the calibration of a model describing the speed-flow relationship on freeways and multilane highways in the state of São Paulo, Brazil. The calibrated model follows the recommendations made by the authors involved in the development of the model used by the Highway Capacity Manual – HCM 2010. The calibration used a sample of 788,122 observations, collected by 25 stations on four highways at São Paulo state: SP-348, SP-021, SP-280 and 270 SP. The analysis of the data showed that, as advocated by the HCM 2010, there is range of flows in which the average speed of the passenger cars remains constant and equal to the free flow speed. It was also found that the classification scheme used by HCM 2010, comprising freeways and multilane highways, is not adequate for highways in the state of São Paulo. A new classification scheme, which divides highways into urban or rural sections, is proposed. For these classes, representative values for the capacity were found, and the speed-flow relation was calibrated. The comparison between the two sets of curves produced showed that the average speed of the traffic stream on urban highways has an earlier and steeper drop than the observed on rural highways. In addition, the estimated values for the capacity C and for the speed at capacity CS for urban highways are lower compared to the estimated for rural highways. Compared to the model used by the HCM 2010, the main difference lies in the significantly lower values for BP , the traffic flow from which the average speed declines as the density of the traffic stream increases. Another important indication is that, although the capacity values are similar between the model used by the HCM 2010 and the calibrated model, the speed at capacity CS is higher at São Paulo state highways.

Keywords: highways; freeways; multilane highways; speed-flow relationship; capacity; HCM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Diagramas de Greenshields [1935].....	31
Figura 2-2: Evolução da relação fluxo-velocidade em autoestradas ao longo das edições do HCM.....	36
Figura 2-3: Curvas fluxo-velocidade do HCM 2010 para: (a) autoestradas; (b) rodovias de pista dupla [TRB, 2010]	38
Figura 2-4: Curvas fluxo-velocidade preliminares para autoestradas [Roess, 2009a]	42
Figura 3-1: Configuração e área de influência dos dispositivos de acesso (<i>ramps</i>).....	49
Figura 3-2: Configuração típica de um trecho de entrelaçamento (<i>weaving</i>).....	50
Figura 3-3: Configuração e área de influência dos dispositivos de acesso (<i>ramps</i>).....	53
Figura 3-4: Estações de coleta de dados disponíveis.....	54
Figura 3-5: Sensores de tráfego em torno da região metropolitana de São Paulo.....	55
Figura 3-6: Montagem do banco de dados	55
Figura 3-7: Perfil SRTM e greides médios – SP-280, km 35,5 a 38,5	61
Figura 3-8: Exemplo de figura esquemática gerada pelo algoritmo desenvolvido – SP-280...	62
Figura 3-9: Subtrechos em dispositivos de acesso e entrelaçamentos.....	64
Figura 3-10: Subtrecho à montante de uma praça de pedágio.....	65
Figura 3-11: Rodovias estudadas e sensores de tráfego selecionados	66
Figura 3-12: Sensores de tráfego selecionados em torno da região metropolitana de São Paulo	67
Figura 3-13: Trecho com configuração ideal	69
Figura 4-1: Observações da velocidade média dos automóveis em função da taxa de fluxo de tráfego (veíc/(h.faixa)), em cada uma das faixas de tráfego da SP-280, km 22,4 oeste ...	72
Figura 4-2: Observações feitas em período de operação atípica – SP-021, km 22,3 norte	75
Figura 4-3: Série temporal de período de operação atípica – SP-021, km 22,3 norte.....	76
Figura 4-4: Análise de <i>cluster</i> para separação do fluxo congestionado do não congestionado – SP-021, km 18,3 norte.....	78
Figura 4-5: Observações em condições de baixo fluxo em: (a) rodovias rurais; (b) rodovias urbanas	79
Figura 4-6: Observações de velocidade e taxa de fluxo após tratamento – SP-021, km 22,3 norte.....	81
Figura 4-7: Histogramas das velocidades observadas por intervalos de fluxo de tráfego.....	82
Figura 5-1: Dados coletados na SP-348, km 32 norte, autoestrada em zona rural.....	89
Figura 5-2: Dados coletados na SP-280, km 29,5 leste, autoestrada em zona urbana	89
Figura 5-3: Dados coletados na SP-280, km 75,9 oeste, rodovia de pista dupla em zona rural	90
Figura 5-4: Exemplos de trechos rurais e urbanos	93

Figura 5-5: Modelo PLM e distribuição de Weibull – SP-021, km 22,3 norte.....	100
Figura 5-6: Efeito da inclinação do greide i na densidade na capacidade CD	101
Figura 5-7: BP e desvio padrão da velocidade em torno de FFS – SP-280, km 59,6 leste ...	104
Figura 5-8: BP e desvio padrão da velocidade em torno de FFS – SP-280, km 29,5 leste ...	104
Figura 5-9: Tendência de redução de BP com o aumento de FFS em rodovias rurais	105
Figura 5-10: Tendência de redução de BP com o aumento de FFS em rodovias urbanas.....	106
Figura 6-1: Médias e medianas das observações de velocidade, por intervalo de fluxo	111
Figura 6-2: Curvas fluxo-velocidade para a SP-348, km 32 norte, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010	114
Figura 6-3: Curvas fluxo-velocidade para a SP-021, km 18,3 sul, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010	115
Figura 6-4: Curvas fluxo-velocidade para a SP-280, km 29,5 leste, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010	116
Figura 6-5: Curvas fluxo-velocidade para a SP-270, km 36,8 oeste, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010	116
Figura 6-6: Níveis de acerto das estimativas de nível de serviço obtidas através do modelo proposto e através do modelo usado no HCM 2010.....	117
Figura 6-7: Curvas fluxo-velocidade propostas para rodovias rurais	119
Figura 6-8: Curvas fluxo-velocidade propostas para rodovias urbanas	119
Figura 6-9: Comparação entre o modelo proposto para rodovias urbanas e modelo do HCM 2010 para rodovias de pista dupla (<i>multilane highways</i>)	120
Figura 6-10: Comparação entre o modelo proposto para rodovias rurais e modelo do HCM 2010 para autoestradas (<i>freeways</i>).....	121
Figura 7-1: Curvas fluxo-velocidade propostas – Rodovias rurais.....	127
Figura 7-2: Curvas fluxo-velocidade propostas – Rodovias urbanas	127
Figura A-1: SP-348, km 47 norte.....	140
Figura A-2: SP-348, km 50 norte.....	140
Figura A-3: SP-348, km 50 sul	141
Figura A-4: SP-348, km 59 norte.....	141
Figura A-5: SP-348, km 65 norte.....	142
Figura A-6: SP-348, km 65 sul	142
Figura A-7: SP-348, km 87 norte.....	143
Figura A-8: SP-348, km 87 sul	143
Figura A-9: SP-348, km 131,7 norte.....	144
Figura A-10: SP-021, km 18,3 norte.....	144
Figura A-11: SP-021, km 22,3 norte.....	145
Figura A-12: SP-280, km 16 oeste.....	145

Figura A-13: SP-280, km 27 leste	146
Figura A-14: SP-280, km 37 leste	146
Figura A-15: SP-280, km 51,9 leste	147
Figura A-16: SP-280, km 59,6 leste	147
Figura A-17: SP-280, km 75,9 oeste	148
Figura A-18: SP-280, km 18,4 marginal leste	148
Figura A-19: SP-270, km 39,9 leste	149
Figura B-1: Interface principal do aplicativo desenvolvido para o tratamento de trechos.....	151
Figura B-2: Dados de entrada: trilhas gravadas com o auxílio de GPS	152
Figura B-3: Dados de entrada: pontos de interesse informados pela ARTESP e DER-SP	152
Figura B-4: Relatório gerado: perfil vertical da rodovia analisada	153
Figura B-5: Relatório gerado: croqui esquemático da rodovia analisada.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Equações das curvas do HCM 2010	39
Tabela 3-1: Pontos de coleta selecionados e descartados	66
Tabela 3-2: Características dos trechos selecionados	67
Tabela 3-3: Lista dos pontos de coleta selecionados	70
Tabela 4-1: Características do fluxo nos locais observados	83
Tabela 5-1: Características dos trechos estudados em função do tipo de via (urbana ou rural)	92
Tabela 5-2: Sensores usados como pontos de controle	98
Tabela 5-3: Capacidade, velocidade na capacidade e densidade na capacidade por trecho ..	101
Tabela 5-4: Limites das curvas fluxo-velocidade	106
Tabela 6-1: Erro quadrático médio associado ao modelo calibrado e o usado no HCM.....	112
Tabela 6-2: Comparação entre os valores estimados com o modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla rurais e os valores do HCM 2010 para <i>freeways</i>	113
Tabela 6-3: Comparação entre os valores estimados com o modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla urbanas e os valores do HCM 2010 para <i>multilane highways</i>	113
Tabela 7-1: Comparação do modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla rurais com o modelo do HCM 2010 para <i>freeways</i>	128
Tabela 7-2: Comparação do modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla urbanas com o modelo do HCM 2010 para <i>multilane highways</i>	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ARTESP	Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo
CCR	Companhia de Concessões Rodoviárias
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
HCQSC	<i>Highway Capacity and Quality of Service Committee</i>
PLM	<i>Product Limit Method</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TCU	Tribunal de Contas da União

LISTA DE SÍMBOLOS

BP	Ponto de transição, a partir do qual a velocidade decresce com o aumento do
fluxo	(cp/h)
C	Capacidade (veíc/h ou cp/h)
$Curv$	Curvatura ($^{\circ}/\text{km}$)
CS	Velocidade na capacidade (km/h)
CD	Densidade na capacidade (veíc/km)
D	Densidade (veíc/km)
FFS	Velocidade de fluxo livre (km/h)
h	<i>headway</i> médio entre veículos (m)
L_d	Comprimento médio do sensor de tráfego (m)
L_v	Comprimento médio dos veículos em uma mesma corrente de tráfego (m)
O	Ocupância (%)
P_T	Percentual de veículos pesados (%)
$R\&F$	<i>Rise & Fall</i> (m/km)
S	Velocidade média (km/h)
t	Tempo médio de viagem (h ou s)
V	Volume de tráfego (veíc/h)
v	Fluxo de tráfego (veíc/h ou cp/h)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Contexto	21
1.2	Justificativa	23
1.3	Meta e objetivos	25
1.4	Estrutura do texto	26
2	TEORIA DO FLUXO DE TRÁFEGO.....	27
2.1	Parâmetros macroscópicos de tráfego.....	27
2.1.1	Volume e fluxo de tráfego	27
2.1.2	Velocidade e tempo de viagem.....	28
2.1.3	Densidade e ocupância	29
2.2	Relação fundamental de tráfego.....	30
2.3	Capacidade e relação fluxo-velocidade	33
2.3.1	Capacidade.....	33
2.3.2	Modelo fluxo-velocidade do HCM	34
2.4	Calibração de modelos fluxo-velocidade e capacidade	39
2.4.1	Capacidade.....	39
2.4.2	Modelo fluxo-velocidade do HCM	41
2.4.3	Adaptações do modelo do HCM às condições do Brasil.....	43
2.5	Considerações finais	44
3	CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRECHOS RODOVIÁRIOS	47
3.1	Contexto.....	47
3.2	Aspectos dos trechos a serem considerados	48
3.2.1	Tipos de trechos	48
3.2.2	Limitações do método do HCM	50
3.2.3	Condições padrão em rodovias de pista dupla e autoestradas	51
3.2.4	Seleção de trechos	52
3.3	Localização dos trechos	53
3.4	Montagem do banco de dados.....	55
3.4.1	Fontes de dados	56
3.4.2	Visita a campo	56
3.4.3	Tratamento dos dados	57

3.4.4	Avaliação do relevo	59
3.4.5	Base de dados completa	62
3.4.6	Segmentação	63
3.5	Classificação e seleção dos trechos	63
3.5.1	Características físicas e operacionais dos trechos	63
3.5.2	Abrangência das observações	65
3.5.3	Trechos selecionados e suas características	65
3.6	Considerações finais	70
4	TRATAMENTO DOS DADOS DE TRÁFEGO.....	71
4.1	Dados utilizados	71
4.2	Método de tratamento.....	73
4.2.1	Erros dos sensores	73
4.2.2	Restrições temporárias na capacidade ou velocidade	74
4.2.3	Fluxo congestionado e não congestionado.....	76
4.2.4	Velocidade de fluxo livre e intervalo de fluxos com velocidade constante.....	78
4.2.5	Veículos pesados	79
4.3	Resultados	80
4.4	Considerações finais	84
5	LIMITES DAS CURVAS FLUXO-VELOCIDADE	87
5.1	Classificação dos trechos.....	87
5.2	Modelo do HCM	93
5.3	Densidade na capacidade <i>CD</i>	95
5.3.1	Método	96
5.3.2	Resultados	99
5.4	Ponto de transição <i>BP</i>	102
5.4.1	Método	102
5.4.2	Resultados	103
5.5	Limites das curvas	106
5.6	Considerações finais.....	106
6	RELAÇÃO ENTRE FLUXO E VELOCIDADE.....	109
6.1	Calibração.....	109
6.2	Estudo da relação fluxo-velocidade para os locais estudados	111
6.3	Verificação da adequação do modelo proposto às rodovias paulistas.....	114
6.4	Relação entre fluxo e velocidade.....	118

6.5	Considerações finais	121
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
7.1	Conclusões	123
7.2	Recomendações	128
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE A	139
	APÊNDICE B.....	151

1 INTRODUÇÃO

Os investimentos em infraestrutura rodoviária e outras formas de melhoramento no sistema de transporte representam um meio importante para fomentar o desenvolvimento econômico regional e nacional, já que podem reduzir custos e expandir as oportunidades econômicas, ajudando a aumentar, potencialmente, a renda e o padrão de vida dos habitantes de uma região [Haddad, 2006]. As rodovias em particular respondem pelo transporte de 60% da carga e 90% dos passageiros no Brasil, aproximadamente [CNT, 2011], ressaltando a função estrutural do modo rodoviário no sistema de transportes nacional.

De maneira a avaliar a adequação da oferta de rodovias à demanda por viagens, destacou-se o método apresentado pelo *Highway Capacity Manual* (HCM), desenvolvido desde a década de 50 nos Estados Unidos, e posteriormente adotado no mundo todo. Hoje, o HCM é a principal referência para a avaliação operacional de rodovias, definindo as medidas de desempenho e o conjunto de procedimentos estabelecidos para sistematizar e uniformizar a medição da qualidade do serviço [Setti, 2009], que reflete o quão bem determinada estrada opera, conforme a percepção dos usuários [FDOT, 2009]. A qualidade da operação é estratificada quantitativamente em níveis de serviço, de A a F. Hoje, o manual se encontra em sua quinta edição (HCM 2010).

1.1 Contexto

A padronização e a facilidade de compreensão do conceito de nível de serviço, tanto por técnicos quanto tomadores de decisão, conduziram ao estabelecimento do HCM como norma técnica em várias partes do mundo. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) indica, em estudos de tráfego, a adoção do roteiro de cálculo do HCM para a avaliação do cenário existente e o benefício gerado com a introdução de obras de

melhoramento [DNIT, 2006a]. Em seu Manual de Estudos de Tráfego, o órgão vai além, explicando em língua portuguesa o método apresentado originalmente pelo HCM 2000 [DNIT, 2006b].

No entanto, o HCM ressalta que seus procedimentos foram concebidos a partir das características observadas nas rodovias norte-americanas, e devem ser adaptados às condições locais de cada região na qual for utilizado [TRB, 2010]. Trata-se de uma necessidade frequentemente percebida pelos profissionais do setor de transportes do Brasil, sendo que na última década, vários órgãos e autores vêm recomendando a adaptação do HCM às condições das rodovias do país, a partir do estado da arte [Demarchi, 2000; Egami e Setti, 2006; DNIT, 2006b, p. 263; Riente *et al.*, 2008a; Setti, 2009; Riente *et al.*, 2011].

Neste contexto, o recente interesse pela adaptação do HCM às condições das rodovias brasileiras pode ser ligado ao avanço de programas de concessão de rodovias, nos quais o poder público define a obrigatoriedade do atendimento a padrões de qualidade conforme definidos pelo manual. Para as rodovias paulistas administradas por concessionárias, por exemplo, a Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), considerando que a monitoração da condição operacional é parte do serviço delegado à iniciativa privada, determina como obrigatória a utilização do HCM para verificação do atendimento a padrões de desempenho operacional [ARTESP, 2004], devendo ser implantadas obras de aumento de capacidade caso o nível de serviço na hora de projeto seja pior do que o limite estabelecido nos contratos de concessão. Regras similares podem ser verificadas nos programas estaduais do Paraná e Minas Gerais e no programa federal de concessão.

Na ocasião da concessão da BR-116 e da BR-324, na Bahia, o Tribunal de Contas da União (TCU) proferiu um acórdão, com recomendações à Agência Nacional de Transportes

Terrestres (ANTT), dentre as quais a adequação do HCM, de modo que os resultados obtidos a partir de sua aplicação reflitam com maior fidelidade a realidade brasileira [TCU, 2008].

O emprego dos métodos do HCM sem adaptações locais, ou com adaptações sem o embasamento técnico-científico desejável, leva a resultados que podem estimar incorretamente a qualidade do serviço experimentada pelos usuários da via [Setti, 2009]. Dessa forma, há a possibilidade da estruturação de planos e programas de concessão com intervenções aquém do desejável, com prejuízo para o conforto e a segurança dos usuários, ou ao contrário, com mais obras do que o necessário, levando ao dispêndio desnecessário de recursos em um determinado local, em detrimento de outros com maior carência de investimentos, em uma mesma janela de tempo. Ambos os casos incorrem em ineficiência econômica para a sociedade como um todo.

Com a adoção de melhores práticas, é possível conciliar qualidade do serviço com racionalização dos investimentos realizados numa via, o que pode propiciar uma maior capacidade de investimento do Estado, contribuir para a viabilização de novos programas de concessão de rodovias, ainda com a possibilidade efetiva de promoção de políticas de modicidade tarifária [Riente *et al.*, 2011].

1.2 Justificativa

No que tange especificamente aos segmentos rodoviários com duas ou mais faixas por sentido, os estudos desenvolvidos na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) para adaptação às condições nacionais já contam com uma tese de doutorado [Demarchi, 2000] e uma dissertação de mestrado [Cunha, 2007]. Esses estudos obtiveram como principal produto conjuntos de fatores de equivalência para veículos pesados brasileiros, que podem ser usados em substituição aos do HCM. Os valores calculados mais recentemente para os equivalentes veiculares podem ser encontrados em Cunha e Setti [2009].

Outro aspecto a ser considerado em uma adaptação do HCM ao ambiente viário brasileiro consiste na definição das condições base em rodovias em termos de infraestrutura e tráfego, seguida pela determinação da capacidade de tráfego nessas condições [Setti, 2009]. O conceito de capacidade é definido pelo HCM como a maior taxa de fluxo horária sob a qual veículos conseguem passar por um dado ponto ou seção durante certo período de tempo, sob condições usuais de demanda e da via [TRB, 2010]. Esse aspecto está diretamente atrelado às medidas de desempenho que caracterizam a corrente de tráfego e são utilizadas para determinar o nível de serviço. Para autoestradas e rodovias de pista dupla, a principal medida usada pelo HCM é a densidade, ligada à velocidade média de percurso e ao fluxo de tráfego por meio de curvas empíricas fluxo-velocidade, que refletem o desempenho dos veículos e o comportamento dos motoristas em um dado local.

Modelos que relacionam fluxo e velocidade também estão presentes em diversas de aplicações em engenharia de transportes, como exemplificado a seguir. Na esfera dos estudos de demanda, essa relação é empregada por métodos de alocação de tráfego para o ajuste de funções de atraso, que definem o incremento das impedâncias relacionadas a cada rota possível em função de aumentos no volume de tráfego. O modelo *Highway Development and Management* (HDM-4), por sua vez, emprega funções de atraso para a estimativa de custos operacionais veiculares, usados em avaliações econômicas de projetos, programas e estratégias de investimento em rodovias. Por fim, observações de fluxo e velocidade são frequentemente usadas para calibrar variados simuladores microscópicos de tráfego, de forma a garantir que os resultados produzidos pelos modelos teóricos empregados pelos microssimuladores se ajustem às condições efetivamente aferidas em campo.

A calibração da relação fluxo-velocidade requer dados empíricos, que contenham observações de fluxo e velocidade desagregadas entre veículos leves e pesados, para trechos rodoviários

com condições variadas. Nesse sentido, outro aspecto decorrente da consolidação dos programas de concessão de rodovias foi a sistematização de procedimentos de coleta de dados de tráfego, normalmente com o uso de laços indutivos ou outra tecnologia equivalente. Nesse contexto, uma das motivações para a realização deste estudo foi a possibilidade de obtenção de uma ampla base de dados, para 76 trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas, com o apoio da ARTESP e das concessionárias de rodovias CCR ViaOeste, CCR RodoAnel e CCR AutoBan.

1.3 Meta e objetivos

Buscando fornecer subsídios para a adaptação do HCM às rodovias brasileiras, este trabalho tem como meta produzir um conjunto de curvas fluxo-velocidade que possam substituir as do manual americano, bem como valores representativos para a capacidade em rodovias de pista dupla e autoestradas brasileiras. De modo a atingir essa meta, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar os trechos homogêneos de rodovias de pista dupla e autoestradas para os quais se dispõem de dados de tráfego e identificar os trechos que podem produzir dados adequados à calibração de um modelo fluxo-velocidade;
2. Obter e tratar uma amostra representativa de dados de tráfego para os trechos selecionados;
3. Verificar a adequabilidade da classificação apresentada pelo HCM, entre autoestradas (*freeways*) e demais rodovias de pista dupla (*multilane highways*), para as rodovias paulistas;
4. Propor modelos representativos para a capacidade de tráfego e a relação fluxo-velocidade em rodovias paulistas, a partir da amostra disponível; e
5. Comparar a capacidade e as relações fluxo-velocidade refletidas pelo modelo calibrado com as propostas pelo modelo do HCM.

1.4 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O primeiro consiste nesta introdução.

O Capítulo 2 resume a revisão bibliográfica empreendida, que abrange os modelos atuais que descrevem a relação entre o fluxo e a velocidade média da corrente de tráfego em rodovias de pista dupla e autoestradas.

O Capítulo 3 explica o método usado para a caracterização e classificação dos trechos homogêneos, para montar um banco de dados com informações das características operacionais e das vias que podem afetar o modelo a ser calibrado, com base nos conceitos estabelecidos pela literatura.

O Capítulo 4 relata o procedimento usado para o tratamento dos dados de tráfego, (fluxo e velocidade, classificados por faixa de tráfego e entre veículos de passeio e pesados).

O Capítulo 5 detalha o modelo fluxo-velocidade do HCM 2010 e os procedimentos para estabelecer os limites da porção do modelo a ser calibrada, incluindo a capacidade.

O Capítulo 6 apresenta o método usado para calibrar as curvas fluxo-velocidade. Como no HCM 2010, são fornecidas curvas em função da velocidade de fluxo livre, juntamente com a equação que as descreve.

O Capítulo 7 resume as principais conclusões e tece recomendações para pesquisas futuras.

2 TEORIA DO FLUXO DE TRÁFEGO

A corrente de tráfego é formada a partir da interação entre veículos e condutores individuais, entre si e com o ambiente viário. Como as características dos motoristas variam de acordo com o local e ao longo do tempo, o estudo do comportamento do tráfego envolve sempre um elemento de variabilidade. De modo a lidar com essa questão, os modelos desenvolvidos para descrever a corrente de tráfego devem levar em consideração intervalos normais de comportamento, que definem a forma como os engenheiros de tráfego analisam, avaliam e planejam melhorias dos sistemas viários.

Para tanto, são definidos parâmetros passíveis de serem medidos ou estimados. Dentre os parâmetros comumente empregados, os chamados macroscópicos descrevem as características agregadas da corrente de tráfego, enquanto os microscópicos lidam com as interações veículo a veículo.

Este trabalho aborda trechos de fluxo não interrompido de autoestradas e rodovias de pista dupla (respectivamente *freeways* e *multilane highways*, conforme o HCM 2010), que geralmente consistem em segmentos viários nos quais a distância entre interseções ou dispositivos de controle seja igual ou superior a três quilômetros [Roess *et al.*, 2010].

2.1 Parâmetros macroscópicos de tráfego

Para trechos de fluxo não interrompido de autoestradas e rodovias de pista dupla, os três principais parâmetros macroscópicos do tráfego são fluxo, velocidade média e densidade e são descritos a seguir.

2.1.1 Volume e fluxo de tráfego

Denomina-se volume V o número total de veículos que passam num dado ponto ou seção de uma via, sentido ou faixa de tráfego durante um determinado período de tempo [Gerlough e

Huber, 1975 apud Hall, 1992]. Os volumes podem ser classificados por categoria de veículo e totalizados em períodos de tempo. Em oposição ao volume de tráfego, o fluxo de tráfego v não representa o número total de veículos que passa por uma dada seção, mas sim a taxa de passagem desses veículos em uma determinada unidade de tempo. Usualmente v é dado em veíc/h ou cp/h (veículos equivalentes de passeio) mesmo para períodos inferiores a uma hora:

$$v = \frac{V}{t}. \quad (2.1)$$

2.1.2 Velocidade e tempo de viagem

Em uma mesma corrente de tráfego, os veículos têm velocidades diferentes entre si. Assim, a velocidade do fluxo S deve ser caracterizada por um valor médio das velocidades individuais dos veículos. O tempo de viagem t é o intervalo de tempo médio que uma corrente de tráfego despende para percorrer a distância entre o ponto inicial e final de uma viagem, e é inversamente proporcional à velocidade média.

Pode-se calcular a velocidade média no tempo ou no espaço. A velocidade média no tempo S_t é medida em um ponto fixo da rodovia e pode ser calculada como a média aritmética das velocidades instantâneas S_i de cada veículo durante um período de tempo, considerando os n veículos que passam pelo local:

$$S_t = \frac{1}{n} \sum_i^n S_i. \quad (2.2)$$

A velocidade média no espaço S_s vem sendo definida de várias formas, nem sempre equivalentes [Hall, 1992]. S_s é medida ao longo de um trecho de via, em oposição à S_t , medida em um ponto ou seção. Uma das maneiras mais aceitas de calcular S_s é através da relação entre o comprimento d do trecho e a média dos tempos t_i gastos por cada um dos n veículos que o percorre [Lighthill e Whitham, 1955 apud Hall, 1992]:

$$S_s = \frac{d}{\frac{1}{n} \sum_i^n t_i}. \quad (2.3)$$

S_s também pode ser estimada a partir de medições da velocidade em um ponto através da média harmônica das velocidades instantâneas de cada veículo S_i [Wardrop, 1952 apud Hall, 1992]:

$$S_s = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_i^n \frac{1}{S_i}}. \quad (2.4)$$

Com o uso da formulação apresentada pela Equação 2.4, a variável referente ao comprimento d de via é suprimida, sendo as velocidades medidas pontualmente. Como consequência, os valores de S_s obtidos por meio das Equações 2.3 e 2.4 são compatíveis apenas para um trecho no qual a variação das velocidades ao longo de sua extensão não seja acentuada [Hall, 1992]. Caso contrário, a estimativa por meio da Equação 2.4 pode incorrer em erro, normalmente associado à estimativa de uma velocidade média no espaço acima da efetivamente praticada na via [Kennedy *et al.*, 1973 apud Hall, 1992].

Vale notar que para a maioria dos procedimentos do HCM que usam a velocidade como uma medida de desempenho, utiliza-se a velocidade média no tempo [TRB, 2010], devendo ser medida caso a caso a cada trecho homogêneo. Hall e Persaud [1989] corroboram essa premissa, considerando adequado trabalhar com medidas pontuais de velocidade e fluxo, considerando-as válidas enquanto as características físicas e de tráfego se mantiverem homogêneas.

2.1.3 Densidade e ocupância

A densidade D é dada pela relação entre a quantidade de veículos em um trecho de via e a extensão do mesmo. A densidade é uma medida macroscópica da distância entre veículos, afetando diretamente a liberdade de manobra e conforto psicológico dos motoristas [Roess *et*

al., 2010]. Por isso, dentre os três principais parâmetros macroscópicos de tráfego, a densidade é o que se relaciona mais diretamente com o nível de serviço em autoestradas e rodovias de pista dupla, no método do HCM.

Apesar de sua importância, a densidade é um parâmetro de difícil mensuração. Medidas diretas podem ser feitas através de fotos ou filmagens aéreas do tráfego, mas os métodos e equipamentos de coleta contínua de dados não são capazes de obter medidas diretas da densidade. No entanto, a evolução da tecnologia de coleta por laços indutivos, que medem parâmetros em um trecho curto de via, acabou por produzir uma nova medida, chamada ocupância [Hall, 1992].

A ocupância no tempo O é definida como o percentual do tempo no qual um subtrecho de comprimento L_d se encontra ocupado, ou coberto. A partir de O , é possível estimar D , em veíc/km, por meio de:

$$D = \frac{1.000 \times O}{L_v + L_d}, \quad (2.5)$$

em que L_v é o comprimento dos veículos na corrente de tráfego, sendo L_v e L_d em metros. No entanto, nos locais nos quais a frota de veículos é heterogênea, L_v varia significativamente, e a estimativa de D por meio da Equação 2.5 pode não produzir resultados confiáveis.

2.2 Relação fundamental de tráfego

Dentre as relações existentes entre os parâmetros macroscópicos de tráfego, destaca-se a interação entre o fluxo v , a velocidade S e a densidade D . Para cada par disponível dos parâmetros apresentados é possível estimar o terceiro, por meio da relação fundamental do tráfego:

$$v = S \times D. \quad (2.6)$$

O modelo de Greenshields [Greenshields, 1935 apud Hall, 1992] pressupõe uma relação linear entre S e D , o que faz com que as relações v - S e D - v sejam representadas por parábolas, conforme mostrado nos diagramas da Figura 2-1.

Figura 2-1: Diagramas de Greenshields [1935]

As curvas mostradas na Figura 2-1 ilustram vários pontos notáveis. A velocidade máxima representa a velocidade hipotética praticada pelos veículos quando o fluxo e a densidade são iguais a zero. No outro extremo, a densidade máxima corresponde à saturação da via, quando a velocidade é nula e o espaçamento entre os veículos é o mínimo possível. O ponto médio das curvas representa a operação na capacidade, na qual o fluxo é o máximo possível.

Desde o modelo pioneiro de Greenshields, outros foram propostos. No entanto, a interação entre as variáveis de tráfego ainda não é totalmente compreendida, de forma que nenhum modelo pode ser considerado comprovadamente superior aos demais. Além disso, a constante evolução da tecnologia viária, automotiva e a variabilidade inerente ao comportamento humano fazem necessária a calibração periódica de qualquer modelo a ser usado, e também em função do local no qual este é aplicado.

Apesar das suas limitações, os modelos baseados nas variáveis macroscópicas de tráfego assumem um papel central em um significativo número de métodos, softwares e manuais. Por exemplo, o método do HCM para avaliação da capacidade e do nível de serviço em trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla baseia-se na relação fluxo-velocidade [TRB, 2010],

definida conforme um modelo empírico desenvolvido a partir de observações coletadas em rodovias dos Estados Unidos da América.

Em comum, o modelo de Greenshields e o apresentado pelo HCM se baseiam em curvas macroscópicas, calibradas a partir de dados empíricos. Outra abordagem inclui um modelo baseado em curvas fluxo-velocidade macroscópicas derivadas de um modelo microscópico *car-following* [Van Aerde, 1995]. Como o modelo Greenshields, o modelo de Van Aerde apresenta a vantagem de modelar a relação fluxo-velocidade em um regime único, sem distinções entre congestionado e livre, como ocorre no HCM.

Brilon e Poncelet [1995] propuseram um modelo baseado numa analogia com um modelo de filas M/M/1. Esse modelo é utilizado no manual de capacidade alemão – HBS 2011, que no Brasil é aceito pelo DNIT [2006] como alternativa ao HCM. Os autores do modelo questionam a porção constante das curvas fluxo-velocidade preconizada no HCM, e não empregam o conceito de velocidade de fluxo livre como definido pelo manual americano. No entanto, em um trabalho recente [Brilon e Lohoff, 2011], é proposta uma ligeira alteração no equacionamento original, de forma a estabelecer o patamar para fluxos de tráfego baixos e possibilitar o emprego direto da velocidade de fluxo livre *FFS*, aproximando o modelo ao apresentado pelo HCM.

Tanto para o modelo de Van Aerde quanto para o modelo de Brilon, os valores para os parâmetros de calibração e demais variáveis devem ser determinados caso a caso [Brilon e Lohoff, 2011]. O formato da curva varia em função desses valores; no entanto, para a porção não congestionada elas se assemelham bastante entre si e com as curvas do HCM, a tal ponto que é por vezes difícil fazer uma distinção entre os modelos somente por meio de uma análise visual.

2.3 Capacidade e relação fluxo-velocidade

Neste item, será definido o conceito de capacidade, bem como as características associadas à operação nessa condição. Em seguida, serão expostos alguns dos modelos que definem a capacidade e a relação entre o fluxo e a velocidade, em especial o apresentado pelo HCM.

2.3.1 Capacidade

A capacidade de tráfego, conforme definida no HCM, consiste no maior fluxo de veículos que passa por determinada seção da via, admitindo-se que não há influência das condições operacionais a jusante, tais como filas que se estendam até o ponto de análise. Vale notar ainda que a capacidade não é determinada como a maior taxa de fluxo observada em determinado sistema ou elemento viário, mas sim como taxas de fluxo que podem ser atingidas repetidamente em condições prevalecentes da via, tráfego, clima, e controle [TRB, 2010].

A natureza estocástica da capacidade é ressaltada em outros estudos [Bassan e Polus, 2010], sendo sugerido que o planejamento ou a avaliação do nível de serviço operacional deva se basear em valores representativos para esse parâmetro.

Em estudos recentes realizados nos Estados Unidos da América, Alemanha, Israel e China, foram obtidos valores representativos para a capacidade em autoestradas variando em um intervalo entre 2.000 e 2.500 veíc/(h.faixa) [Bassan e Polus, 2010; Zhao *et al.*, 2009], similares aos apresentados pelo HCM.

A capacidade é difícil de ser observada em campo, sobretudo por dois motivos: (1) não há como saber se um valor máximo de fluxo observado em um momento não poderia ser superado em outro e; (2) o próprio conceito de capacidade corresponde à operação em condições instáveis, sendo que a alteração de quaisquer fatores, tais como familiaridade dos

motoristas com a via ou a composição do fluxo de tráfego pode alterar significativamente os valores observados para os fluxos máximos [TRB, 2010].

Além disso, observa-se que os fluxos máximos atingidos a partir de condições de fluxo livre são normalmente superiores aos fluxos máximos de descarga em um regime congestionado [Roess *et al.*, 2010]. Em um estudo no qual se investigou esse fenômeno, foi notado que a capacidade em um estrangulamento reduz-se a partir do momento no qual a fila se forma e o trecho passa a operar em regime congestionado [Banks, 1990]. Dessa maneira, a partir do momento em que filas se formam em uma rodovia, é a capacidade de descarga que regula o tempo de recuperação da via [Hall e Agyemang-Duah, 1991].

Em vista disso, conclui-se que não é factível determinar valores representativos para a capacidade de tráfego usando dados da porção congestionada da relação fluxo-velocidade, obtidos em locais a montante dos pontos de restrição do sistema, nos quais são formadas filas [Hall e Hall, 1990; Hall e Agyemang-Duah, 1991]. Da mesma forma, a coleta de dados após um gargalo pode não produzir dados adequados, posto que o fluxo de tráfego, restrito pelo trecho anterior, tende a não atingir a capacidade do trecho de coleta [Chin e May, 1991].

2.3.2 Modelo fluxo-velocidade do HCM

Segundo o HCM, a qualidade da viagem como percebida pelos usuários é avaliada por meio de seis níveis de serviço, que constituem uma medida quantitativa e qualitativa que caracteriza a condição da corrente de tráfego em uma dada via, considerando fatores tais como velocidade, tempo de viagem, liberdade de manobra, interrupções de tráfego, conforto e conveniência [TRB, 2010]. De modo a relacionar os níveis de serviço com parâmetros operacionais que possam ser observados em campo, utilizam-se medidas de desempenho. Para rodovias de pista dupla e autoestradas, a medida de desempenho usada é a densidade do tráfego. A estimativa do nível de serviço é feita a partir de curvas fluxo-velocidade calibradas

com base em dados empíricos. O desenvolvimento do modelo fluxo-velocidade usado no HCM se deu conforme descrito a seguir.

A primeira edição do manual, de 1950, não continha quantidade significativa de material sobre trechos rodoviários de fluxo não interrompido. Apenas na segunda edição [HRB, 1965], a primeira a ser desenvolvida sob orientação do *Highway Capacity and Quality of Service Committee* (HCQSC), foram apresentadas as características fundamentais e métodos de análise para autoestradas e rodovias de pista dupla, incluindo as primeiras curvas fluxo-velocidade [Roess, 2011a], baseadas na velocidade de projeto da via.

A terceira versão do HCM, publicada em 1985 e revisada em 1994 [TRB, 1994] foi a primeira a apresentar um conjunto de curvas baseadas na velocidade de fluxo livre (*FFS*), ao invés da velocidade de projeto. O conceito de *FFS* ganhou ainda maior importância a partir das conclusões de diversos estudos empreendidos entre o fim da década de 1980 e princípio da década de 1990, que mostraram que há um significativo intervalo de fluxos de tráfego no qual a velocidade média dos automóveis se mantém virtualmente equivalente à *FFS* [Hall e Agyemang-Duah, 1991; Urbanik II *et al.*, 1991; Banks, 1990; Persaud e Hurdle, 1988; Hall e Hall, 1990; Chin e May, 1991]. Tal premissa se mantém até a edição atual [TRB, 2010].

A partir do conhecimento da existência e relevância desse patamar de velocidades, o projeto de pesquisa conduzido por Schoen *et al.* [1995] concentrou seus esforços na determinação, para cada curva fluxo-velocidade, dos fluxos de tráfego correspondentes aos pontos de transição (*BP*) a partir dos quais a velocidade média começa a declinar com o aumento do fluxo. Esse trabalho, que também investigou valores para a capacidade e velocidade na capacidade, subsidiou a elaboração da quarta edição do HCM, publicada em 2000 [TRB, 2000]. A Figura 2-2 mostra a evolução da relação entre fluxo e velocidade ao longo das

edições do HCM, tomando como exemplo uma curva para velocidade inicial próxima a 60 milhas/h, conforme o sistema de unidades usado pelo HCM.

Figura 2-2: Evolução da relação fluxo-velocidade em autoestradas ao longo das edições do HCM

O HCM 2000 originalmente apresentava curvas fluxo-velocidade para autoestradas com velocidade de fluxo-livre variando entre 80 e 110 km/h. Com o aumento do limite legal de velocidade nos EUA, foi sentida a necessidade da existência de uma nova curva, de 120 km/h. Essa nova curva foi formada a partir de uma extrapolação das existentes, sem que um novo estudo fosse realizado, sendo sua capacidade estabelecida como 2.400 cp/(h.faixa), próxima à capacidade para a curva de 110 km/h [Roess, 2011a].

Para a elaboração do HCM 2010, foi realizado um estudo para a recalibração da curva fluxo-velocidade de 120 km/h em autoestradas [Roess, 2009b], que exigiu a coleta de dados para uma ampla faixa de velocidades de fluxo livre. Com isso, todo o conjunto de curvas pôde ser reavaliado [Roess, 2011b]. O modelo para rodovias de pista dupla foi mantido inalterado em

relação ao usado no HCM 2000, por falta de recursos para financiar os estudos necessários para sua substituição.

O banco de dados usado nesse estudo [Roess, 2009b] consistiu em 48 trechos em autoestradas americanas, sendo dezesseis pertencentes ao banco de dados que subsidiou a elaboração do HCM 2000 [Schoen *et al.*, 1995]. Os dados foram agrupados em intervalos de 15 minutos, somando um total de 5.665 observações.

As curvas fluxo-velocidade produzidas [Roess, 2009b] mantiveram a abordagem usada pelo HCM 2000, sofrendo apenas pequenas alterações no formato. Além disso, as equações apresentadas pelo HCM 2010 foram simplificadas, embora consistam essencialmente na mesma formulação matemática constante no HCM 2000 [Roess, 2011b]. A principal alteração na edição atual do manual se deu nos valores atribuídos ao ponto em que a velocidade da corrente começa a decrescer, (*BP*). A análise dos dados sugeriu que a porção das curvas na qual a velocidade é constante e igual à de fluxo livre seria mais curta do que o indicado pelo HCM 2000, sendo os valores da taxa de fluxo correspondentes a esse ponto apresentados pelo HCM 2010 inferiores aos usados na edição anterior.

Como resultado desse processo, a quinta edição do HCM [TRB, 2010] apresenta curvas fluxo-velocidade para autoestradas com *FFS* entre 120 km/h e 90 km/h e para rodovias de pista dupla com *FFS* entre 100 km/h e 70 km/h, representativas de uma ampla gama de características físicas e operacionais. A Figura 2-3 mostra as curvas do HCM 2010 para os dois tipos de via, em unidades métricas. O fluxo de tráfego é expresso em carros de passeio, de forma que os veículos pesados devem ser convertidos para automóveis, com o uso de fatores de equivalência. Da mesma forma, a velocidade apresentada corresponde à velocidade média no espaço dos automóveis.

Com relação à estrutura lógica do conjunto de curvas como um todo, percebe-se que os valores estabelecidos para a capacidade C são linearmente crescentes em função da velocidade de fluxo livre FFS , visto que a densidade na capacidade é admitida constante. O inverso ocorre com relação aos pontos de quebra BP , para as autoestradas. Para as rodovias de pista dupla, BP foi considerado constante para todas as curvas (1.400 cp/(h.faixa)). Em ambos os casos, o caráter linear da relação BP - FFS se mantém. Por fim, vale destacar que a porção das curvas que liga BP a C são sempre de forma convexa, mantendo uma transição suave com a porção de velocidade constante.

Figura 2-3: Curvas fluxo-velocidade do HCM 2010 para: (a) autoestradas; (b) rodovias de pista dupla [TRB, 2010]

A Tabela 2-1 apresenta a estrutura das equações das curvas do HCM 2010 para autoestradas e rodovias de pista dupla, segundo a velocidade de fluxo livre FFS , em milhas por hora. As relações mostradas são válidas para fluxos de tráfego entre BP e C , e consistem em uma simplificação de uma formulação mais complexa [Roess, 2011b].

Tabela 2-1: Equações das curvas do HCM 2010

FFS (mi/h)	Autoestradas	Rodovias de pista dupla
75	$S = 75 - 0,00001107(v - 1000)^2$	não definido
70	$S = 70 - 0,00001160(v - 1200)^2$	não definido
65	$S = 65 - 0,00001418(v - 1400)^2$	não definido
60	$S = 60 - 0,00001816(v - 1600)^2$	$S = 60 - \left[5,00 \left(\frac{v - 1400}{800} \right)^{1,31} \right]$
55	$S = 55 - 0,00002469(v - 1600)^2$	$S = 55 - \left[3,78 \left(\frac{v - 1400}{700} \right)^{1,31} \right]$
50	não definido	$S = 50 - \left[3,49 \left(\frac{v - 1400}{600} \right)^{1,31} \right]$
45	não definido	$S = 45 - \left[2,78 \left(\frac{v - 1400}{500} \right)^{1,31} \right]$

2.4 Calibração de modelos fluxo-velocidade e capacidade

Neste item, são expostas formas de calibração usualmente empregadas para o ajuste de modelos que estabelecem valores representativos para a capacidade e a relação fluxo-velocidade.

2.4.1 Capacidade

No HCM 2000, os valores adotados para a capacidade são médias dos maiores fluxos observados nos trechos estudados, que estão distribuídos por todo o território dos Estados Unidos. Durante a elaboração do HCM 2010, foi decidido que não havia evidência suficiente que justificasse a alteração dos valores adotados no HCM 2000 para a capacidade C e velocidade na capacidade CS [Roess, 2011b].

A relação fluxo-velocidade do HCM é estabelecida apenas para a região de fluxo não congestionado, de forma que a capacidade corresponde ao ponto final das curvas. Para modelos que definem uma equação única para os regimes de fluxo livre e congestionado, como o modelo de Van Aerde, a capacidade é um dos pontos notáveis da curva, de forma que a calibração da equação em si inclui a determinação de C e CS .

Em estudos que modelam o regime congestionado e não congestionado separadamente, a capacidade pode ser determinada como a interseção entre as curvas de cada regime [Bassan e Polus, 2010; Avrenli *et al.*, 2011]. Também é possível estabelecer um valor representativo para a capacidade como a interseção entre a curva fluxo-velocidade calibrada para o regime não congestionado e a densidade limite entre os níveis de serviço E e F, conforme definido pelo HCM (28 cp/(h.faixa), para autoestradas).

Alternativamente, Bassan e Polus [2010] propuseram um método para estimar a capacidade a partir da relação entre fluxo e ocupância, ajustando uma curva para essa relação e observando o fluxo máximo atingido. Os autores ressaltam que esse método requer, necessariamente, uma distribuição homogênea de observações para todo o intervalo de fluxos e ocupância, de modo a evitar distorções nas curvas calibradas e, conseqüentemente, no valor obtido para a capacidade.

Outro conceito explorado por alguns autores [Brilon *et al.*, 2005; Washburn, *et al.*, 2010] para o estudo da capacidade de tráfego é o de colapso da corrente de tráfego (*breakdown*). Neste caso, define-se a capacidade como a máxima taxa de fluxo na transição entre o regime não congestionado e congestionado. Através de séries temporais de dados de tráfego, é possível apontar a ocorrência de um colapso quando é registrada uma forte redução na velocidade média ou um súbito aumento da ocupância [Washburn *et al.*, 2010].

2.4.2 Modelo fluxo-velocidade do HCM

A forma tradicional de se analisar a relação entre dados de fluxo, velocidade e densidade são análises de regressão [Chin e May, 1991]. No entanto, estudos como o desenvolvido por Hurdle e Datta [1983] mostraram que nenhum modelo matemático existente produz um ajuste superior aos demais. Como resultado, muitos pesquisadores abandonaram o procedimento usual de se ajustar funções matemáticas aos dados brutos, passando a elaborar curvas empíricas a partir de análise visual [Chin e May, 1991].

Nesse sentido, desde a primeira edição do HCM a apresentar a relação entre fluxo e velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla [HRB, 1965], a criação das curvas empíricas envolve sempre algum grau de ajuste visual por parte dos profissionais do HCQSC, embora sejam sempre realizadas análises por regressão [Roess, 2011a]. Essa prática se mantém até a versão atual do manual [TRB, 2010].

Para a elaboração do HCM 2010, devido à falta de recursos, a relação fluxo-velocidade das rodovias de pista dupla não foi revista. Para as autoestradas, como exposto anteriormente, a necessidade de se estudar as rodovias com velocidade limite em torno de 120 km/h levou à recalibração de todo conjunto de curvas fluxo-velocidade, sendo testados quatro modelos:

1. O modelo adotado no HCM 2000, com um trecho plano e outro curvo;
2. O modelo proposto por Werner Brilon;
3. O modelo de Greenshields; e
4. Um modelo, proposto por Roger Roess, composto por três segmentos lineares.

Como nas edições anteriores do HCM, um conjunto de curvas foi calibrado para velocidades de fluxo livre *FFS* variando entre 80 e 120 km/h. Para a maioria dos pontos de coleta, *FFS* foi estimada diretamente a partir dos dados obtidos [Roess, 2009b], embora os autores não definam claramente o método utilizado para tanto. Em alguns casos, considerou-se que as

observações em condição de baixo fluxo de tráfego não eram suficientes para a determinação da *FFS*. Nesses casos, a estimativa foi feita com o auxílio de um carro de teste.

Os dados coletados em campo foram então agrupados segundo a velocidade de fluxo livre de cada ponto de coleta. A seguinte classificação foi adotada [Roess, 2011b]:

- 120 km/h: Todos os locais com *FFS* entre 115 e 125 km/h;
- 110 km/h: Todos os locais com *FFS* entre 105 e 115 km/h;
- 100 km/h: Todos os locais com *FFS* entre 95 e 105 km/h; e
- 90 km/h: Todos os locais com *FFS* entre 85 e 95 km/h.

Inicialmente, foi tentada a análise por regressão, para cada curva. Os resultados preliminares, mostrados na Figura 2-4, indicam que os melhores ajustes para cada curva não produzem um “conjunto coerente” de curvas fluxo-velocidade, conforme desejado [Roess, 2009a]. Nota-se que as curvas de *FFS* igual a 110 km/h e 120 km/h são convexas, como esperado, mas a de 100 km/h é quase linear e a de 90 km/h côncava o que, entre outros problemas, leva a uma transição brusca entre a porção de velocidade constante e a porção curva do modelo.

Figura 2-4: Curvas fluxo-velocidade preliminares para autoestradas [Roess, 2009a]

Assim, todo o procedimento usado foi revisto, considerando novas premissas [Roess, 2011b], das quais se destacam:

1. O modelo fluxo-velocidade apresentado no HCM 2000 foi mantido;
2. Os valores fornecidos no HCM 2000 para a capacidade e velocidade na capacidade foram mantidos, para todas as curvas;
3. As curvas devem formar um “modelo coerente” quando visualizadas em conjunto; e
4. As curvas devem produzir, para um mesmo volume de tráfego, velocidades superiores às obtidas nas curvas de rodovias de pista dupla, que foram mantidas conforme apresentadas no HCM 2000.

Sendo o ponto final das curvas definido pela capacidade, a maior parte da análise se concentrou na determinação do ponto no qual a velocidade média dos automóveis passa a decrescer em função do aumento de fluxo de tráfego. Para cada curva, foram testados valores crescentes de *BP*. Em certo ponto, há um aumento súbito do desvio padrão das observações de velocidade média em torno da velocidade de fluxo livre *FFS*. O valor do fluxo de tráfego nesse ponto foi atribuído como *BP*, para cada valor de *FFS*.

Com exceção da curva de 120 km/h, os valores obtidos para *BP* para cada curva, quando avaliados em conjunto, formaram um padrão consistente. A partir desses valores de *BP*, de *C* e de *CS*, foi ajustada a forma das curvas fluxo-velocidade. Dado que os coeficientes de regressão R^2 se mostraram muito baixos, não ultrapassando 0,4, e a necessidade de atender às premissas 2 e 3, descritas anteriormente, o formato das curvas finais foi ajustado visualmente.

2.4.3 Adaptações do modelo do HCM às condições do Brasil

No que tange aos trechos de fluxo não interrompido de autoestradas e rodovias de pista dupla, os esforços no sentido de fornecer subsídios à elaboração de um Manual de Capacidade Rodoviária brasileiro contam com dois trabalhos.

No estudo primeiro, iniciado em 1997 [Demarchi, 2000], foi desenvolvida e calibrada uma versão para o software de simulação microscópica de tráfego Integration, capaz de incorporar os efeitos de veículos pesados sobre o fluxo de tráfego. Em seguida, foram estimados valores para os parâmetros da curva fluxo-velocidade utilizada pelo software, a partir de dados coletados em diversos locais da rodovia SP-330 (Via Anhanguera), com o auxílio de sensores portáteis.

Uma curva fluxo-velocidade foi determinada, para uma velocidade de fluxo livre de 102 km/h [Demarchi e Setti, 2000]. A curva é bastante similar às obtidas em outros estudos, sendo que a velocidade varia pouco até que o fluxo de 1.700 cp/h/faixa seja atingido. A abordagem usada foi o modelo de regime único proposto por Van Aerde.

Sete anos depois, Cunha [2007] apresentou curvas fluxo-velocidade para valores de velocidade de fluxo livre de 110 e 100 km/h, obtidas usando-se o simulador CORSIM calibrado para rodovias do estado de São Paulo. Diferentemente das curvas constantes no HCM 2000 e em Demarchi [2000], as obtidas pelo autor apresentam uma ligeira queda na velocidade mesmo para pequenos fluxos de tráfego.

2.5 Considerações finais

As equações da relação fluxo-velocidade do HCM incluem valores definidos para os parâmetros de calibração do modelo, definidos com base em dados empíricos coletados em rodovias distribuídas pelos Estados Unidos da América. No entanto, o manual sugere ao usuário a utilização de valores calibrados localmente, em substituição aos *defaults* constantes no manual, resultantes da calibração para as condições norte-americanas. [Roess *et al.*, 2010].

No modelo do HCM e outros modelos pesquisados, tanto as curvas fluxo-velocidade quanto a capacidade da rodovia são definidas empiricamente. Assim, a calibração das curvas para

locais com condições diversas daquelas utilizadas na elaboração do HCM original requer a disponibilidade de dados coletados nas rodovias de pista dupla e autoestradas locais, com condições variadas.

Uma das dificuldades enfrentadas quando da condução dos estudos que subsidiaram a elaboração do HCM 2010 foi a insuficiência de recursos para a revisão do modelo do HCM 2000 para rodovias de pista dupla. De forma a manter a coerência do método do manual como um todo, os pesquisadores não podiam aceitar, para as autoestradas, um modelo que levasse ao estabelecimento de velocidades médias inferiores às obtidas pelo modelo de rodovias de pista dupla, para um mesmo fluxo de tráfego e velocidade de fluxo livre. Dessa forma, foi recomendada, para estudos futuros, a calibração simultânea de curvas para autoestradas e rodovias de pista dupla [Roess, 2011b].

Outra observação se refere ao método de calibração usado. Embora as análises por regressão produzam ajustes razoáveis individualmente, as curvas obtidas não formam necessariamente um “conjunto coerente”, sendo usados procedimentos adicionais de ajuste visual para criar um aspecto consistente. Assim, é indicado que estudos para a calibração da capacidade e relação fluxo-velocidade abordem simultaneamente todo o conjunto de curvas.

3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRECHOS RODOVIÁRIOS

Neste capítulo, é apresentado um método para a caracterização de trechos homogêneos rodoviários e sua aplicação para a seleção daqueles candidatos a produzir um conjunto de dados adequado à calibração do modelo proposto [Riente e Setti, 2011]. Nos itens a seguir, são expostos os principais conceitos que dão suporte aos procedimentos seguidos ao longo deste trabalho. Em seguida, é explicado o método desenvolvido. Por fim, são mostrados os principais resultados alcançados.

3.1 Contexto

Até a terceira edição do HCM [TRB, 1985], as curvas fluxo-velocidade e, consequentemente, o método do manual para autoestradas e rodovias de pista dupla, eram diferenciadas segundo a velocidade de projeto da rodovia com um todo [Roess, 2011a]. Com o HCM 1985, foi introduzido o conceito de trechos homogêneos, definidos como segmentos nos quais as características físicas e de tráfego são uniformes. Desde então, o método do HCM para a avaliação de rodovias se baseia na análise individual de cada trecho homogêneo estudado.

Com isso, torna-se necessária a correta caracterização, segmentação e classificação de cada trecho estudado. A definição de trechos homogêneos permite que parâmetros de tráfego coletados em um determinado ponto do trecho sejam considerados válidos para toda a sua extensão, visto a uniformidade das suas características físicas e composição da corrente de tráfego.

Dada a falta de orientação sobre o assunto na literatura consultada neste trabalho, é proposto um método para a caracterização e classificação de trechos homogêneos rodoviários, com base nos conceitos do HCM 2010. O método proposto foi aplicado para a caracterização e

seleção de trechos homogêneos candidatos a produzirem dados para a investigação das relações fundamentais de tráfego em autoestradas e rodovias de pista dupla do estado de São Paulo, a partir de um conjunto inicial de pontos nos quais há coleta automática de dados de tráfego.

A investigação das relações de tráfego requer dados empíricos, coletados por sensores instalados em trechos rodoviários. Esses dados empíricos são usados para gerar um conjunto de curvas fluxo-velocidade que refletem as características da via e dos motoristas. Para tanto, é indispensável o conhecimento das principais características físicas de cada trecho.

O método proposto permite caracterizar trechos homogêneos segundo suas condições físicas e operacionais, a partir de informações advindas de múltiplas fontes. O método proposto inclui: (1) procedimentos para estruturar a agregação de informações advindas de múltiplas fontes num banco de dados único; e (2) a elaboração de ferramentas auxiliares que possam fornecer subsídios à avaliação e seleção de trechos candidatos a produzir dados adequados aos estudos empreendidos.

3.2 Aspectos dos trechos a serem considerados

Neste item, são discutidos os principais aspectos que devem ser considerados para a seleção dos trechos adequados à calibração de um modelo fluxo-velocidade e definição da capacidade básica de tráfego em trechos de rodovias de pista dupla e autoestradas. Esses aspectos incluem as características geométricas e operacionais dos trechos, bem como a qualidade e tipo dos dados de tráfego que podem ser coletados nos mesmos.

3.2.1 Tipos de trechos

Com relação à classificação dos trechos rodoviários segundo o tipo, o HCM define as *multilane highways* (aqui chamadas rodovias de pista dupla convencionais) como vias com

duas ou três faixas por sentido, contando com separador físico central ou não. Nesse tipo de via, pode haver cruzamentos em nível ou semáforos ocasionalmente, desde que espaçados o suficiente para manter condições de fluxo não interrompido na maior parte do trecho. Esse espaçamento mínimo tem sido definido como 3 km [TRB, 2010; Roess *et al.*, 2010].

Autoestradas (*freeways*) são rodovias de pista dupla de alto padrão, que operam necessariamente com divisória central física, e nas quais há total controle dos acessos, na forma de dispositivos especialmente construídos para a entrada e saída de veículos. Tais dispositivos (*ramps*) são normalmente compostos por ao menos dois elementos geométricos principais: a pista do próprio acesso e a sua junção com a rodovia principal. Idealmente, junções devem ser providas de faixas auxiliares, de modo a possibilitar que os veículos atinjam uma velocidade compatível com a via que desejam acessar.

A Figura 3-1 mostra as duas configurações típicas para dispositivos de acesso: (a) entrada (*on-ramp*); (b) saída (*off-ramp*). No caso (a), os veículos que desejam ingressar na via precisam encontrar uma brecha na faixa adjacente à faixa auxiliar, e induzem os veículos que trafegam à direita da autoestrada a mudar de faixa. Em ambos os casos, há geração de turbulência nos arredores da junção. A área de influência desse efeito é preponderante nas duas faixas mais à direita e se estende 450 m a jusante, no caso (a), e 450 m a montante, no caso (b), a partir do ponto de acesso [Roess e Ulerio, 1993; TRB, 2010].

Figura 3-1: Configuração e área de influência dos dispositivos de acesso (*ramps*)

Como regra geral [TRB, 2000; Roess *et al.*, 2010], quando uma saída é precedida por uma entrada a até 750 m de distância, é formado um trecho de entrelaçamento (*weaving*), definido como uma área de cruzamento entre duas ou mais correntes de tráfego em um mesmo sentido, conforme mostrado na Figura 3-2. Em trechos de entrelaçamento, as manobras de mudança de faixa ocorrem com maior frequência, causando significativa turbulência, com influência a até 150 m a montante do princípio do entrelaçamento e 150 m a jusante de seu término [TRB, 2010].

Figura 3-2: Configuração típica de um trecho de entrelaçamento (*weaving*)

No HCM 2010, é apresentado um novo método para análise de entrelaçamentos, que inclui uma equação para se determinar se um segmento opera ou não como *weaving* [Roess *et al.*, 2008]. Vale notar que a calibração desse modelo depende do estabelecimento prévio de valores para a capacidade em trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla, objeto deste estudo.

3.2.2 Limitações do método do HCM

Os métodos apresentados pelo HCM para avaliação da capacidade e do nível de serviço em autoestradas e rodovias de pista dupla foram originalmente calibrados para segmentos com uma gama finita de configurações. As características fora do escopo do manual incluem [TRB, 2010]:

- Faixas especiais, reservadas a um tipo específico de veículo, como faixas de alta ocupação, faixas de ultrapassagem ou faixas de subida;
- Imposição de restrição às manobras de mudança de faixas;
- Segmentos extensos em ponte ou túnel;
- Praças de pedágio a jusante;
- Formação de filas à jusante, como aquelas formadas em acessos a um grande centro urbano;
- Externalidades que alterem o comportamento do motorista no que diz respeito à escolha da velocidade praticada, tais como postos policiais ou dispositivos de fiscalização eletrônica;
- Uso de técnicas de controle de acessos (*ramp metering*) para aumento da capacidade;
- Bloqueios temporários causados por construções, acidentes ou travessia de ferrovias;
- Interferência causada por estacionamento nos acostamentos;
- Presença de pontos de ônibus de uso intensivo; ou
- Circulação significativa de pedestres.

3.2.3 Condições padrão em rodovias de pista dupla e autoestradas

O método preconizado pelo HCM define, inicialmente, a capacidade básica e as curvas fluxo-velocidade para trechos com condições chamadas padrão (*base conditions*), que refletem a operação e a infraestrutura para os quais os modelos apresentados pelo manual são originalmente calibrados. Nos trechos nos quais não existem condições padrão, a velocidade, a qualidade do serviço e a capacidade tendem a ser afetadas [TRB, 2010].

Para trechos de fluxo não interrompido de autoestradas e rodovias de pista dupla, as condições padrão incluem, simultaneamente [TRB, 2010]: pavimento em bom estado de conservação; faixas de tráfego de pelo menos 3,6 m de largura; e largura livre lateral (*lateral*

clearance) externa mínima de 1,8 m, para autoestradas. O largura livre externa consiste na distância entre a borda da faixa de tráfego mais à direita e qualquer obstrução lindeira à via, tal como dispositivos de drenagem, cortes, aterros, sinalização vertical, postes etc.

Além das condições padrão, a calibração de um modelo que descreve as relações fundamentais de tráfego requer o conhecimento das características que afetam a velocidade média dos automóveis e o fluxo equivalente, em cp/h. Tais características incluem: (1) a densidade de acessos, que causam turbulência na corrente de tráfego e tendem a reduzir a velocidade média dos veículos; (2) a geometria vertical e horizontal da via e; (3) a presença de rampas íngremes, conforme definido pelo HCM.

3.2.4 Seleção de trechos

A calibração de um conjunto de curvas fluxo-velocidade requer observações distribuídas homogeneamente por todo o intervalo de fluxos de tráfego [Bassan e Polus, 2010]. A definição dos fluxos máximos representativos deve se basear em pontos de coleta que incluam observações em momentos de operação na capacidade, sob o risco de subestimar esse parâmetro. De modo a observar fluxos que atingem a capacidade em trechos de fluxo não interrompido, é necessário encontrar um ponto no qual a capacidade é atingida com relativa frequência. Dado que os pontos críticos dos sistemas viários normalmente se situam em acessos ou elementos viários com interrupções ao tráfego, a identificação de gargalos em trechos de fluxo não interrompido não constitui tarefa trivial.

De acordo com a literatura [Banks, 1990; Hall, 1992; Roess *et al.*, 2010], uma configuração promissora para a observação de fluxos na capacidade consiste em uma seção a jusante de um acesso, no qual a soma dos fluxos da autoestrada e do acesso exceda a capacidade, conforme mostrado na Figura 3-3. Vale notar que os parâmetros de tráfego devem ser coletados suficientemente a jusante da junção, após sua área de influência.

Figura 3-3: Configuração e área de influência dos dispositivos de acesso (*ramps*)

3.3 Localização dos trechos

Inicialmente, contava-se com um conjunto de laços indutivos instalados em trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla no estado de São Paulo:

- SP-348 (Rodovia dos Bandeirantes), uma autoestrada rural de alto padrão e limite de velocidade 120 km/h, que serve ao tráfego rodoviário de longa distância no sentido ao centro e noroeste do estado de São Paulo;
- SP-021 (Rodoanel Mário Covas Oeste), uma autoestrada localizada no entorno da região metropolitana de São Paulo, concebida para ligar as principais rodovias que chegam a São Paulo, servindo ao tráfego rodoviário que normalmente atravessaria a cidade;
- SP-270 (Rodovia Raposo Tavares), uma rodovia de pista dupla que liga regiões urbanizadas a oeste de São Paulo, entre a capital e Sorocaba; e
- SP-280 (Rodovia Presidente Castelo Branco), que se divide em dois segmentos: o primeiro consiste em uma autoestrada urbana, que liga a cidade de São Paulo, Osasco, Carapicuíba e Barueri e conta com vias marginais em sua extensão inicial; e o segundo consiste em uma rodovia de pista dupla rural, que liga a região metropolitana de São Paulo ao entroncamento com a SP-075.

No total, os sensores de tráfego disponíveis abrangem 42 estações de coleta, sendo onze situadas na SP-348, dezoito na SP-280, sete na SP-270 e seis na SP-021. A Figura 3-4 mostra as rodovias estudadas e a localização dos sensores de tráfego, sendo a região metropolitana de

São Paulo destacada na Figura 3-5. O segmento urbano da SP-280 inclui vias marginais nos dois sentidos, que contam com três a cinco faixas e acessos controlados. Nesse segmento, há sensores instalados em todas as pistas, por vezes no mesmo marco quilométrico, de modo que o espaçamento médio entre eles é menor, em relação aos demais trechos em estudo.

Para cada estação, os dados são coletados em ambos os sentidos de tráfego, com exceção das pistas marginais da SP-280, que operam em sentido único. Dado que em autoestradas e rodovias de pista dupla, cada sentido opera de maneira isolada, os 34 trechos situados em pistas centrais e os oito sensores instalados em pistas marginais geram em conjunto 76 pontos de coleta individuais.

Figura 3-4: Estações de coleta de dados disponíveis

Figura 3-5: Sensores de tráfego em torno da região metropolitana de São Paulo

Nos itens a seguir, é explicado o método desenvolvido para caracterizar cada trecho e selecionar, dentre os pontos de coleta mostrado na Figura 3-4 e na Figura 3-5, aqueles adequados aos objetivos estabelecidos neste estudo.

3.4 Montagem do banco de dados

A Figura 3-6 mostra, de maneira simplificada, o processo seguido para a montagem do banco de dados que subsidia as análises feitas posteriormente, neste estudo. Cada etapa mostrada na figura será detalhada nos itens a seguir.

Figura 3-6: Montagem do banco de dados

3.4.1 Fontes de dados

Para a composição do banco de dados usado neste estudo, foram agregadas informações de diversas fontes de dados. A lista a seguir contém as principais informações utilizadas e suas respectivas fontes:

1. Fotos dos pontos de coleta e cadastro por meio de GPS das trilhas percorridas (*tracks*) e pontos de interesse (*waypoints*), coletados em visita aos trechos estudados;
2. Banco de dados de fotos de satélite disponibilizado pela Google;
3. Localização dos dispositivos de fiscalização eletrônica, fornecida pelo DER-SP;
4. Altimetria de um modelo digital de terreno disponibilizado pela NASA, a partir dos dados do programa *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM; e
5. Informações adicionais fornecidas pela ARTESP incluindo: (1) limites dos trechos homogêneos em estudo; (2) marco quilométrico dos sensores de tráfego; (3) localização das praças de pedágio.

3.4.2 Visita a campo

Inicialmente, a localização de cada laço indutivo foi registrada em uma base de dados geográfica, num software SIG-T. De modo a relacionar o marco quilométrico de cada sensor, conforme informado pela ARTESP, com sua respectiva posição aproximada, utilizou-se a ferramenta “Web Rotas”, disponibilizada pelo DER-SP [2010], capaz de apontar o local correspondente a um determinado marco quilométrico em qualquer rodovia paulista. Assim, foi possível obter as coordenadas geográficas aproximadas de cada sensor.

Em seguida, foi programada uma visita aos pontos de coleta. De forma a auxiliar a identificação em campo de cada subtrecho estudado, as coordenadas dos sensores foram registradas num navegador GPS, que foi utilizado para indicar o local, a melhor rota e a distância restante a ser percorrida para visitar cada sensor durante a coleta de dados.

O equipamento de GPS foi também empregado para gravar o percurso realizado na forma de trilhas (*tracks*), com registros da posição geográfica a intervalos de um segundo. Além disso, foram coletadas todas as características físicas que podem influenciar a capacidade ou a velocidade, que foram anotados em uma planilha eletrônica elaborada em um *tablet*, sendo suas coordenadas geográficas armazenadas no equipamento GPS, na forma de pontos (*waypoints*). Os fatores cadastrados foram:

- Número de faixas, incluindo faixas adicionais e vias marginais;
- Largura dos afastamentos laterais;
- Dispositivos de acessos controlados (*ramps*) e suas faixas auxiliares;
- Acessos não controlados;
- Limite legal de velocidade;
- Postos policiais e balanças;
- Pontes e túneis; e
- Marcos quilométricos.

Adicionalmente, foi conferida a posição exata dos sensores, inicialmente estimada a partir da ferramenta Web Rotas, sendo feitas pequenas correções quando necessário. Por fim, os locais foram fotografados, de modo a complementar a documentação para o banco de dados a ser montado.

3.4.3 Tratamento dos dados

Após a visita, as trilhas registradas pelo navegador GPS foram importadas e tratadas com o auxílio do software *GTM Trackmaker Pro*, empregado para converter arquivo em formato GPX (usado por equipamentos GPS) para uma base de dados geográfica e planilhas eletrônicas.

De posse das trilhas e pontos cadastrados em planilha eletrônica, foi desenvolvido um conjunto de programas em ambiente *Excel/Visual Basic for Applications*, com o objetivo de concatenar as informações coletadas, produzir dados adicionais e, por fim, georreferenciar o conjunto de dados completo, de forma a auxiliar a análise posterior dos trechos estudados. Foi criado um aplicativo capaz de exportar os resultados para o formato KML, para visualização através do software Google Earth. Dessa forma, foi possível conferir ou complementar os dados coletados em campo. Os algoritmos desenvolvidos seguiram as etapas descritas a seguir.

Na primeira etapa, as informações coletadas em campo na forma de pontos (*waypoints*), cujas coordenadas geográficas foram registradas com o auxílio do GPS, são exportadas para o formato KML.

Na segunda etapa, a partir dos marcos quilométricos e das trilhas cadastrados em campo, o aplicativo estrutura e novamente exporta para o formato KML uma grade de marcos quilométricos para toda a extensão registrada de rodovia, a um intervalo constante, especificado pelo usuário. Neste trabalho, utilizou-se como referência um intervalo de 100 m.

Na terceira etapa, a ferramenta é capaz de georreferenciar os pontos de interesse remanescentes, para os quais não são conhecidas as coordenadas geográficas, mas sim o marco quilométrico no qual se situam. Neste trabalho, esses pontos de interesse consistiram na localização dos dispositivos de fiscalização eletrônica, obtidos através do DER-SP [2011], além das informações remanescentes fornecidas pela ARTESP que consistem em entroncamentos viários principais e na localização das praças de pedágio.

3.4.4 Avaliação do relevo

De modo a complementar a base de dados e possibilitar a comparação futura entre trechos, o relevo das vias estudadas foi descrito por dois parâmetros que descrevem a geometria vertical e horizontal de cada trecho homogêneo, conforme definidos por Watanatada *et al.* [1987]:

- *Rise & Fall (R&F)*: parâmetro que descreve a geometria vertical, o *R&F* é definido como a quantidade de subidas e descidas, em metros, percorrida a cada quilômetro de rodovia. Valores iguais ou abaixo de 20 m/km estão associados a greides médios em torno de 2% e terreno plano, enquanto um valor de 80 m/km está associado a greides acima de 8% e terreno montanhoso;
- *Curvatura (Curv)*: parâmetro que descreve a geometria horizontal, a curvatura é definida como a quantidade de curvas, em graus, percorridas a cada quilômetro de rodovia. Valores inferiores a 100°/km estão associados a estradas majoritariamente retilíneas, enquanto um valor de 500°/km representa uma via sinuosa.

A curvatura pode ser calculada de maneira direta a partir das trilhas registradas pelo GPS, que contêm, a intervalos de um segundo, o azimuth em relação à posição do veículo durante o cadastro. A curvatura é calculada como a relação entre a variação absoluta total dos azimuthes ao longo de uma trilha e a extensão do trecho avaliado.

Para o cálculo do *Rise & Fall*, é necessário o registro da variação de altitude ao longo das trilhas. Neste trabalho, o perfil vertical dos trechos estudados foi definido a partir do modelo digital de terreno descrito por Farr *et al.* [2007], produzido através do programa *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), empreendido pela agência espacial norte americana (NASA). O SRTM obteve dados da altitude para toda a superfície terrestre entre +/- 60 graus de latitude, usando um sistema de radares instalados a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, ao longo de onze dias. De forma a acessar o banco de dados da NASA, foi utilizada a ferramenta

GPS Visualizer [Schneider, 2010], capaz de incorporar a altimetria do SRTM a trilhas gravadas em formato GPX por um equipamento GPS.

De forma a eliminar eventuais erros remanescentes na altimetria utilizada, foi feita uma suavização do perfil vertical inicialmente traçado. O método de suavização utilizado foi o de média móvel, com 21 pontos. Assim, sendo as trilhas registradas pelo GPS a intervalos de um segundo, a elevação média em cada ponto considera os registros dos dez segundos anteriores e posteriores.

Vale notar que, se a média móvel empregada for aritmética, são atribuídos pesos iguais a todos os 21 pontos, o que cria a possibilidade de se subestimar o *Rise & Fall* e possíveis rampas críticas ao longo do terreno. Assim, a média móvel feita foi ponderada segundo uma distribuição de Gauss, na qual o ponto central recebe o peso máximo e os registros periféricos, pesos decrescentes, segundo uma distribuição normal. Como resultado, eliminam-se ruídos nos perfis verticais traçados, evitando no entanto suavizar em excesso os pontos nos quais a diferença de elevação é significativa, além do patamar que pode ser atribuído a erros nos dados de altimetria.

De posse do perfil vertical dos trechos estudados, foi elaborado um algoritmo para a identificação dos subtrechos em greides específicos, que segundo o HCM [TRB, 2010] possuem: (1) inclinação inferior a 3% e comprimento superior a 800 m ou; (2) inclinação igual ou maior do que 3% e comprimento superior a 400 m. Essa identificação é necessária, visto que um aclave forte ou longo pode impactar não apenas o desempenho dos veículos pesados, como as características operacionais de toda a corrente de tráfego [Roess *et al.*, 2010].

Primeiramente, o algoritmo percorre o perfil geométrico da rodovia estudada, de modo a identificar o início e fim de cada greide, definidos como os pontos nos quais ocorre uma

mudança no sinal do gradiente. De forma a evitar que pequenas oscilações do terreno sejam consideradas rampas isoladas, foi introduzido um filtro, configurável pelo usuário, que consiste em valores mínimos de declividade e extensão a serem atingidos para que seja considerada a segmentação de um novo greide.

A partir dos pontos de início e fim de cada greide, e da diferença de elevação entre eles, é possível calcular as rampas médias, através da expressão:

$$i = \frac{\Delta H}{x_f - x_i}, \quad (3.1)$$

em que x_f e x_i são os pontos inicial e final de cada greide, respectivamente, e ΔH é a variação de elevação entre eles.

Com a declividade e extensão de cada rampa, é possível selecionar aqueles classificados como greides específicos, segundo os critérios do HCM. A Figura 3-7 consiste em um exemplo do tratamento descrito neste item, para o segmento entre o km 35,5 e o km 38,5 da SP-280, no entorno do sensor de tráfego instalado no km 37. A figura mostra o perfil de altitudes originalmente obtido através do SRTM sob o perfil suavizado. As linhas tracejadas representam os greides médios, calculados por meio da Equação (3.1).

Figura 3-7: Perfil SRTM e greides médios – SP-280, km 35,5 a 38,5

No Apêndice B, é feita uma breve apresentação do aplicativo desenvolvido, sendo mostrada a interface do usuário e os principais relatórios gerados.

3.4.5 Base de dados completa

Através do método descrito, organizou-se um banco de dados contendo: (1) base de dados geográfica, que pode ser visualizada em conjunto com o banco de fotos de satélite disponibilizado pela Google [2011]; (2) planilha eletrônica; e (3) fotografias tiradas em campo. De forma a facilitar a visualização das informações contidas nas planilhas, foi desenvolvido um algoritmo capaz de gerar figuras esquemáticas dos trechos avaliados, contendo todas as características coletadas, como em Urbanik II *et al.* [1991]. A Figura 3-8 mostra um exemplo de alguns dos elementos ilustrados pelas figuras geradas pelo algoritmo desenvolvido, para um segmento da SP-280, próximo à cidade de São Paulo. A escala usada e o sentido no qual a rodovia é apresentada podem ser alterados pelo usuário. Além disso, é possível ocultar alguns elementos, tais como a ocupação lindeira (lateral) e os acessos, se desejado.

Figura 3-8: Exemplo de figura esquemática gerada pelo algoritmo desenvolvido – SP-280

3.4.6 Segmentação

Após o registro, no banco de dados, de todas as informações que podem afetar o modelo a ser calibrado neste trabalho, procedeu-se à segmentação dos subtrechos estudados. Sendo os dados de tráfego coletados pontualmente, torna-se relevante identificar as características que podem afetar diretamente o comportamento do tráfego no ponto de coleta. Seguindo a recomendação da literatura consultada [Hall, 1992; Roess *et al.*, 2011], considerou-se neste estudo subtrechos de 3 km, tomando o sensor de tráfego como o ponto central. Assim, os parâmetros calculados anteriormente, tais como o *Rise & Fall* e a Curvatura, representam as características viárias observadas para um segmento que se estende de 1,5 km a montante do sensor até 1,5 km a jusante do mesmo. Além disso, é verificada a existência de homogeneidade para essa extensão e assim, a forma de tratamento a ser dado aos dados coletados pelo sensor.

3.5 Classificação e seleção dos trechos

A partir da análise das fotografias, da base de dados geográfica, das figuras esquemáticas e dos dados de tráfego disponíveis, foram selecionados os trechos adequados ao estudo e destacados aqueles que poderiam produzir dados adequados à calibração do modelo fluxo-velocidade, como explicado a seguir.

3.5.1 Características físicas e operacionais dos trechos

Apenas trechos de autoestrada e rodovias de pista dupla interessam à análise das relações fluxo-velocidade. Assim, foi necessário eliminar da base de dados aqueles que se situam em: (1) trecho de entrelaçamentos (*weavings*); ou (2) na área de influência de um dispositivo de acesso (*ramps*).

Após a análise do banco de dados, foi verificado que, dos 76 pontos de coleta totais, seis se enquadram no primeiro caso e doze no segundo. Dessa forma, tem-se efetivamente 58 pontos de coleta em trechos regulares de autoestradas e rodovias de pista dupla. Como exemplo, a Figura 3-9 mostra um segmento da pista marginal oeste da SP-280, entre o km 20 e o km 23, no qual se situam três sensores. É possível verificar que o laço indutivo instalado no km 22,5 se encontra a menos de 450 m do acesso do km 22,9 estando, portanto, sob sua área de influência. Os sensores do km 20,4 e km 21,2, por sua vez, se situam em subtrechos de entrelaçamento, com uma saída precedida por uma entrada a menos de 750 m de distância, sendo ambas unidas por uma faixa auxiliar.

Com relação às limitações do método do HCM, é necessário verificar quais dos trechos apresentam os elementos listados no item 3.2.2, que fogem ao escopo do método, excluindo-os das análises a serem feitas posteriormente.

Figura 3-9: Subtrechos em dispositivos de acesso e entrelaçamentos

Dos 58 pontos de coleta remanescentes, 25 foram descartados em decorrência: (1) da presença de postos policiais lindeiros à via; (2) do efeito causado por túneis ou pontes longas; ou (3) do impacto causado por restrições de capacidade à jusante, em consequência de praças de pedágio, rampas críticas ou do acesso ao sistema viário urbano da cidade de São Paulo. A Figura 3-10 ilustra um trecho da SP-021, sentido norte, que contém um sensor logo à

montante de uma praça de pedágio, sofrendo influência da formação de filas a partir da mesma.

Figura 3-10: Subtrecho à montante de uma praça de pedágio

3.5.2 Abrangência das observações

Por meio da observação dos dados de tráfego disponíveis, foi possível destacar os trechos nos quais se verifica a operação na capacidade. Para os demais, procurou-se identificar aqueles que contam com ao menos parte da porção curva da relação fluxo-velocidade, o que possibilita investigar o ponto de transição e obter indícios do formato do modelo a calibrar. Os demais trechos foram descartados.

Dos 33 trechos remanescentes, oito foram descartados por apresentar observações apenas para fluxos de tráfego muito baixos, abaixo de 500 cp/(h.faixa), enquanto outros oito se destacaram por apresentar operação na capacidade, constituindo pontos chave para obter dados para a calibração do modelo proposto.

3.5.3 Trechos selecionados e suas características

Ao fim das análises descritas nos itens anteriores, 25 pontos de coleta foram efetivamente considerados como candidatos para a produção de dados para a calibração de um modelo fluxo-velocidade, dentre os 76 iniciais. A Figura 3-11 e a Figura 3-12 discriminam os trechos

selecionados dos descartados para análise, enquanto a Tabela 3-1 mostra um resumo dos pontos de coleta avaliados, ainda divididos segundo a classificação do tipo de trecho no qual se situam.

Tabela 3-1: Pontos de coleta selecionados e descartados

Rodovia	Total	Selecionados	Descartados
<i>Autoestradas (freeways)</i>			
SP-348	20	11	9
SP-280	7	4	3
SP-021	12	3	9
<i>Rodovias de pista dupla (multilane highways)</i>			
SP-280	11	5	6
SP-270	8	2	6
<i>Dispositivos de acessos (ramps) e entrelaçamentos (weavings)</i>			
SP-348	2	0	2
SP-280	10	0	10
SP-270	6	0	6
Total	76	25	51

Figura 3-11: Rodovias estudadas e sensores de tráfego selecionados

Figura 3-12: Sensores de tráfego selecionados em torno da região metropolitana de São Paulo

Para os trechos selecionados, a Tabela 3-2 mostra os intervalos e os valores médios obtidos para as características que podem afetar a velocidade de fluxo livre *FFS* [Washburn *et al.*, 2010], sendo que o *Rise & Fall*, a curvatura e a densidade de acessos são calculadas para uma extensão de 3 km, tomando o sensor de tráfego como ponto central. A geometria para as rodovias de pista dupla estudadas é, de forma geral, mais acentuada do que nas autoestradas. Além disso, nas autoestradas, os acessos são controlados e menos frequentes, enquanto que nas rodovias de pista dupla ocorre o oposto.

Tabela 3-2: Características dos trechos selecionados

Característica	Autoestradas			Rodovias de pista dupla		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
<i>Rise & Fall</i> (m/km)	4	19	37	14	32	42
Curvatura (°/km)	8	38	65	33	62	124
Greide (%)	-3,5	0	3,5	-4,5	1,9	5,5
Distância entre acessos (km)	1,1	5,0	12,4	n/d	n/d	n/d
Densidade de acessos (acessos/km)	n/d	n/d	n/d	1,0	3,2	7,0

Além das características listadas na Tabela 3-2, outras informações de interesse armazenadas na base de dados incluem:

- Tipo de região lindeira das rodovias: rural ou urbano;
- Número de faixas e presença de faixas auxiliares de dispositivos de acesso;
- Extensão e declividade dos greides;
- Largura dos afastamentos laterais interno e externo;
- Presença de postos policiais, dispositivos de fiscalização eletrônica;
- Trecho em túnel ou ponte; e
- Restrições de capacidade a jusante, como as causadas por praças de pedágio e greides críticos.

Dos 25 trechos selecionados, oito apresentam observações no regime congestionado, não congestionado e na capacidade. Desses, cinco possuem uma configuração física próxima à ideal [Banks, 1990; Hall, 1992; Roess et al., 2010], conforme descrito no item 3.2.4.

Como exemplo, a Figura 3-13 mostra o trecho correspondente ao sentido norte do km 22,3 da SP-021, entre os acessos à SP-270 e SP-280. Nesse, o sensor de tráfego localiza-se a jusante de dois acessos relevantes, correspondentes ao entroncamento com a SP-270, mas já fora de sua área de influência direta. Isso sugere que a soma dos volumes de tráfego do trecho à montante da SP-021 e da SP-270 produzam fluxos de tráfego que eventualmente atinjam a capacidade e assim, adequados à produção de dados para a calibração de um modelo que descreve a capacidade e a relação fluxo-velocidade.

Figura 3-13: Trecho com configuração ideal

A Tabela 3-3 lista os 25 pontos de coleta selecionados, por rodovia. São indicados o local e o sentido de cada ponto, bem como o tipo de trecho, a ocupação lindeira à via e os parâmetros geométricos. No total, catorze trechos correspondem a autoestradas rurais e quatro urbanas. Quanto aos trechos de rodovias de pista dupla, quatro se situam em região rural e três na região metropolitana de São Paulo.

Quanto à geometria dos trechos selecionados, pode-se constatar que todas as rodovias em área urbana e as rodovias de pista dupla rurais apresentam em média rampas mais fortes e um padrão geométrico mais restritivo. Especificamente com relação à curvatura, embora haja variação entre os valores calculados para cada trecho, nenhum pode ser considerado uma via sinuosa, de acordo com os critérios expostos no item 3.4.4. No Capítulo 4, discute-se o tratamento dos dados de tráfego fornecidos por esses sensores.

Tabela 3-3: Lista dos pontos de coleta selecionados

km	Sentido	Tipo de via	Ocupação lindeira	Rise & Fall (m/km)	Curvatura (°/km)	Greide (%)
SP-348 (Rodovia dos Bandeirantes)						
32	Norte	Autoestrada	Rural	28,0	64,5	3,5%
47	Norte	Autoestrada	Rural	25,1	33,8	-1,5%
50	Norte	Autoestrada	Rural	16,1	8,4	3,0%
50	Sul	Autoestrada	Rural	16,1	8,4	-3,0%
59	Norte	Autoestrada	Rural	25,2	33,8	1,0%
65	Norte	Autoestrada	Rural	25,2	33,8	1,0%
65	Sul	Autoestrada	Rural	25,2	33,8	-1,0%
87	Norte	Autoestrada	Rural	21,4	45,5	2,5%
87	Sul	Autoestrada	Rural	21,4	45,5	-2,5%
131,7	Norte	Autoestrada	Rural	18,9	36,0	-2,0%
149,6	Norte	Autoestrada	Rural	30,1	28,4	-3,5%
SP-021 (Rodoanel Mário Covas Oeste)						
18,3	Norte	Autoestrada	Rural	3,5	32,3	-1,0%
18,3	Sul	Autoestrada	Rural	3,5	32,3	1,0%
22,3	Norte	Autoestrada	Rural	11,4	41,7	-2,0%
SP-270 (Rodovia Raposo Tavares)						
36,8	Oeste	Rodovia de pista dupla	Urbana	38,8	123,8	-0,5%
39,9	Leste	Rodovia de pista dupla	Urbana	41,3	94,0	5,5%
SP-280 (Rodovia Presidente Castelo Branco)						
16	Oeste	Rodovia de pista dupla	Urbana	13,6	33,4	1,5%
18,4	Leste	Autoestrada	Urbana	12,2	62,2	0,1%
22,4	Oeste	Autoestrada	Urbana	9,1	28,1	0,5%
27	Leste	Autoestrada	Urbana	37,4	61,5	3,5%
29,5	Leste	Autoestrada	Urbana	23,7	32,5	2,0%
37	Leste	Rodovia de pista dupla	Rural	41,7	32,7	5,0%
51,9	Leste	Rodovia de pista dupla	Rural	30,9	50,0	4,5%
59,6	Leste	Rodovia de pista dupla	Rural	25,7	35,6	1,5%
75,9	Oeste	Rodovia de pista dupla	Rural	30,8	63,1	-4,5%

3.6 Considerações finais

Foi apresentado um método para a caracterização e análise de trechos homogêneos rodoviários, baseado na montagem de um banco de dados único. Para tanto, na primeira etapa do método, foram indicadas as fontes de informações utilizadas e explicado o processo de obtenção, tratamento e agregação dos dados. Também foi descrito um algoritmo para a definição do relevo das rodovias estudadas, a partir de um cadastro feito com auxílio de equipamento GPS. Por fim, foram expostos os relatórios gerados para subsidiar a etapa posterior do trabalho. Na segunda etapa do método, foi descrita a análise dos trechos, de forma a selecionar os candidatos a produzir dados adequados à calibração do modelo estudado. Como resultado do processo empreendido, dos 76 pontos de coleta iniciais, 25 se mostraram efetivamente adequados a serem usados nas etapas posteriores do estudo.

4 TRATAMENTO DOS DADOS DE TRÁFEGO

A calibração de um modelo empírico que descreva a capacidade de tráfego e relação fluxo-velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla requer um conjunto significativo de dados coletados em campo [Roess *et al.*, 2010]. Neste trabalho são utilizados os dados obtidos através dos sensores selecionados a partir do método apresentado no Capítulo 3.

4.1 Dados utilizados

Os dados de tráfego usados na calibração do modelo fluxo-velocidade do HCM devem conter apenas veículos de passeio na corrente de tráfego, operação normal e condições de demanda que não excedam a capacidade da via [TRB, 2010].

O conjunto de dados disponível abrange o período entre janeiro de 2010 e agosto de 2011 e contém observações do número de veículos e da velocidade média para automóveis e veículos pesados, em intervalos de seis minutos para a SP-348, e cinco minutos para a SP-021, SP-280 e SP-270. Os estudos que subsidiaram a elaboração do HCM 2010 usaram dados de tráfego relativos a cada quinze minutos [Roess, 2011b]. No entanto, diversos autores vêm recomendando, como ideal, um intervalo em torno de cinco minutos [Sache, 1993; Demarchi e Setti, 2000; Bassan e Polus, 2010; Washburn *et al.*, 2010], satisfatoriamente curto para representar mais detalhadamente o comportamento da corrente de tráfego, mas longo o suficiente para evitar que a variabilidade inerente ao comportamento individual dos motoristas crie distorções nas medidas de velocidade ou no cálculo do fluxo de tráfego.

Em outros estudos, vários autores adotaram procedimentos distintos com relação à análise dos dados de tráfego de várias faixas em um mesmo sentido. Em comparação com as rodovias americanas, as duas mais importantes particularidade do ambiente viário brasileiro que podem

interferir na estimativa do nível de serviço são: a maior relação massa/potência típica dos caminhões e o elevado percentual de veículos pesados [Setti, 2009].

A Figura 4-1 mostra as nuvens de pontos inicialmente obtidas para cada uma das três faixas do km 22,4 da SP-280, no sentido oeste, sendo o fluxo de tráfego dado em veíc/hora/faixa. Na faixa mais à esquerda, o percentual de veículos pesados P_T é igual a 1% da corrente de tráfego, e são observados fluxos superiores a 2.000 veíc/h/faixa. Na faixa central, P_T se aproxima de 20%, e os fluxos se reduzem fortemente. Na faixa da direita, por sua vez, P_T atinge 45%, e as maiores observações de fluxo não atingem 1.500 veíc/h/faixa. Além disso, observa-se uma queda precoce na velocidade média dos automóveis. Neste trabalho, optou-se por focar a análise na faixa mais à esquerda, na qual a corrente é composta majoritariamente por automóveis e é menor o efeito dos veículos pesados, cujo impacto no tráfego ainda é pouco conhecido, sendo os resultados dos estudos existentes [Cunha e Setti, 2009] preliminares.

Figura 4-1: Observações da velocidade média dos automóveis em função da taxa de fluxo de tráfego (veíc/(h.faixa)), em cada uma das faixas de tráfego da SP-280, km 22,4 oeste

Além disso, análises do processo de formação de congestionamento a cada faixa de tráfego sugerem que as filas começam a se formar a partir da faixa mais à esquerda, que serve maiores volumes de tráfego, se estendendo a montante e para as demais faixas em seguida [Banks, 1989].

4.2 Método de tratamento

Este item explica o método usado para o tratamento dos dados de tráfego. Primeiramente, as observações de todos os sensores foram padronizadas em um banco de dados único, sendo eliminados os pontos nos quais o fluxo de automóveis seja nulo. As informações reunidas a partir dos dados coletados incluem:

- Data e hora de início do intervalo;
- Número de automóveis;
- Número de veículos pesados;
- Velocidade média dos automóveis; e
- Ocupância.

4.2.1 Erros dos sensores

Os sensores de tráfego usados para coletar os dados disponibilizados para este estudo consistem em laços indutivos, capazes de detectar alterações no campo magnético em seu entorno causadas pela passagem de veículos sobre a via na qual estão instalados. Como qualquer dispositivo eletrônico, os sensores estão sujeitos a falhas de funcionamento devido aos mais diversos motivos. Dessa forma, a primeira parte do tratamento dos dados consistiu na eliminação de observações com erros aparentes, tendo sido considerados as seguintes condições iniciais: (1) informações faltantes; (2) contagem diferente de zero e velocidade zero; e (3) valores negativos de contagem, velocidade ou ocupância, atribuídos automaticamente pelo software dos sensores no caso de mau funcionamento do dispositivo.

Em seguida, foi usado um teste para verificar eventuais travamentos dos sensores em determinados períodos. Considerou-se que quando a velocidade média e a contagem simultaneamente se mantêm idênticos por mais de três observações consecutivas, ocorre mau funcionamento do sensor naquele período. Nesse caso, mantem-se apenas a primeira observação. Da mesma forma, se a contagem ou a velocidade isoladamente se mantiverem exatamente iguais por mais de cinco observações, o mesmo critério foi aplicado.

Por fim, fluxos acima de 2.800 veíc/(h.faixa) ou a associação de velocidades médias muito altas (normalmente acima de 180 km/h) e mais de um veículo em um mesma observação foram associados a erros nos sensores e considerados *outliers*, sendo eliminados do banco de dados, como sugerido em Washburn *et al.* (2010).

4.2.2 Restrições temporárias na capacidade ou velocidade

Nesta etapa do método de tratamento de dados, foi desenvolvido um procedimento para a identificação de períodos de operação atípica, fora do escopo do modelo do HCM, ligadas a condições de caráter temporário como: (1) incidentes ou acidentes; (2) esquemas de operação ou fiscalização diferentes dos atuais; (3) e efeitos causados por zonas de obras.

Como em Demarchi e Setti [2000], o método desenvolvido consistiu em um algoritmo que produz uma animação gráfica, plotando as observações de fluxo e velocidade a cada dia e em sequência cronológica, a intervalos de tempo definidos pelo usuário. Adicionalmente, neste trabalho incluiu-se um segundo gráfico que representa a variação de velocidade média do fluxo ao longo do dia, a intervalos de cinco (ou seis) minutos. A partir da análise das imagens produzidas, foi possível associar excentricidades nos padrões dos dados de tráfego com períodos de tempo específicos, que foram então descartados.

A Figura 4-2 mostra parte da nuvem de pontos do sentido norte do km 22,3 da SP-021. Em destaque, são exibidas as observações obtidas para o dia 6 de abril de 2010, uma terça feira. É possível notar que, para esse dia, a transição entre o fluxo livre para o congestionado ocorre com fluxos máximos menores do que 1.600 cp/(h.faixa) sendo que, normalmente são observados com regularidade fluxos superiores a 2.200 cp.(h/faixa).

A Figura 4-3 mostra a série temporal da velocidade média dos automóveis a cada hora do mesmo dia. A partir do gráfico, identifica-se uma queda brusca nos valores medidos a partir de 6:00, descrevendo a formação de um congestionamento. Embora o período congestionado corresponda ao pico da manhã, os fluxos máximos correspondentes são menores do que o esperado e do que os verificados em outro dias, como mostrado na Figura 4-2, o que sugere uma restrição temporária na capacidade do trecho.

Figura 4-2: Observações feitas em período de operação atípica – SP-021, km 22,3 norte

Figura 4-3: Série temporal de período de operação atípica – SP-021, km 22,3 norte

4.2.3 Fluxo congestionado e não congestionado

Apenas os dados do regime não congestionado e na capacidade interessam à calibração de um modelo fluxo-velocidade proposto. Nos pontos de coleta nos quais a capacidade é atingida, o limite que divide o regime congestionado do não congestionado não é evidente. Assim, fez-se necessária a sistematização de um processo para a estimativa de um valor de velocidade que defina o ponto de divisão entre os regimes.

A abordagem adotada neste trabalho se baseou em uma solução usada em estudos anteriores [Bessa Júnior, 2009, Sun e Zhou, 2005], que aplicaram a análise de *cluster*, através do método *k-means*, que consiste em uma técnica da estatística multivariada que estabelece n agrupamentos de objetos individuais em função de critérios de similaridade, sendo o número de grupos n (*clusters*), definido pelo analista. A forma como o método foi empregado está descrita a seguir.

Para cada sensor, foram considerados dois *clusters*, sendo cada observação de fluxo e velocidade um objeto. Inicialmente foram estabelecidas duas sementes, que representam o

centroide de cada *cluster*, com coordenadas x (fluxo v) e y (velocidade S) aleatórias. As distâncias entre cada observação de velocidade e cada centroide k são então calculadas como:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - S_k)^2}, \quad (4.1)$$

em que: d_{ik} : distância entre cada observação i e cada centroide k ;

N : número total de observações;

S_i : valor de velocidade média do objeto i ; e

S_k : valor de velocidade do centroide de cada *cluster*.

De acordo com as distâncias calculadas, cada observação é atribuída ao centroide mais próximo. Em seguida, as coordenadas dos centroides são recalculadas como o centro de massa das observações atribuídas a ele. O processo é repetido até que a convergência seja atingida.

O método descrito foi aplicado a todos os oito pontos de coleta nos quais a capacidade é atingida, sendo seis situados em trechos de autoestradas e dois em rodovias de pista dupla. Foi considerada a faixa de fluxos na qual há observações na transição entre o fluxo congestionado e não congestionado. Para cada estação, o algoritmo convergiu para os mesmos resultados, independentemente da semente utilizada.

A Figura 4-4 mostra um exemplo dos resultados da análise de *cluster* para o ponto de coleta no sentido norte do km 18,3 da SP-021. Foram analisados fluxos de tráfego acima de 1.750 cp/(h.faixa), a partir dos quais se verifica com mais intensidade observações na transição entre os regimes congestionado e não congestionado. Cada cluster resultante está representado por uma cor. Verificou-se que o valor limite de velocidade entre os dois agrupamentos corresponde a 75 km/h, que representa simultaneamente a maior velocidade dentre as observações referentes ao agrupamento classificado como congestionado e o menor valor

dentre as observações em fluxo não congestionado. Como resultado, considerou-se que todas as observações com velocidade inferior a 75 km/h pertencem ao regime congestionado.

Figura 4-4: Análise de *cluster* para separação do fluxo congestionado do não congestionado – SP-021, km 18,3 norte

4.2.4 Velocidade de fluxo livre e intervalo de fluxos com velocidade constante

No HCM, as diferentes curvas fluxo-velocidade para autoestradas e rodovias de pista dupla são definidas em função da velocidade de fluxo livre *FFS*, de modo que o cálculo desse parâmetro consiste em uma etapa chave para a calibração do modelo, tendo se dado da forma descrita a seguir.

Primeiramente, foi calculada a média das velocidades observadas para cada sensor a intervalos de fluxo de 50 veíc/h. Em uma primeira análise, verificou-se que, para fluxos baixos, a velocidade média dos automóveis é insensível ao aumento do volume de tráfego, como ilustrado na Figura 4-5, que mostra observações para diversas estações de rodovias de pista dupla e autoestradas, em regiões rurais e de ocupação urbana, até 500 cp/(h.faixa). Isso

sugere que o modelo deve incluir uma porção de velocidade constante e, conseqüentemente, um ponto de transição, a partir do qual a velocidade decresce em função do fluxo de tráfego.

Figura 4-5: Observações em condições de baixo fluxo em: (a) rodovias rurais; (b) rodovias urbanas

Em nenhum caso avaliado foi possível verificar queda na velocidade até o fluxo de 350 cp/(h.faixa). Dessa forma, a *FFS* foi calculada como a média das velocidades médias observadas para os sete intervalos de 50 cp/(h.faixa), até 350 cp/(h.faixa). O desvio padrão das médias não atingiu 2 km/h em nenhum caso, o que reforça a indicação de que, para condições de baixo fluxo de tráfego, a velocidade média dos automóveis é praticamente constante.

4.2.5 Veículos pesados

As curvas fluxo-velocidade são usualmente construídas com apenas veículos de passeio na corrente de tráfego. Na elaboração do HCM 2010 [Roess, 2011b] (e em outros estudos [Chin e May, 1991; Hall e Agyemang-Duah, 1991; Bassan e Polus, 2010]), o fluxo original em veíc/h foi corrigido usando fatores de equivalência para veículos pesados. Na literatura

consultada, foram utilizados valores únicos para os equivalentes veiculares, independentemente de eventuais variações nas características da via e do tráfego.

Ainda que a velocidade considerada seja referente apenas à velocidade média dos automóveis, a presença de veículos pesados pode potencialmente afetar o comportamento dos automóveis. Em decorrência disso, neste estudo, optou-se por utilizar apenas o fluxo de tráfego da faixa mais à esquerda, composto majoritariamente por automóveis. Além disso, foram eliminadas todas as observações nas quais o percentual de veículos pesados P_T se mostrou maior do que 5%.

Pontos com P_T entre 0 e 5 % foram mantidos, de forma a evitar a diminuição exagerada da amostra, especialmente na região próxima à capacidade [Bessa Júnior, 2009]. Nesses casos, foram aplicados os fatores de equivalência apresentados em Cunha e Setti [2009], calculados em um estudo anterior [Cunha, 2007], em que foram calculados valores para os equivalentes de caminhões em rodovias de pista dupla, a partir de dados da frota do estado de São Paulo na época. Foram propostos valores distintos para os equivalentes em função do greide, extensão do trecho e do percentual de veículos pesados na corrente de tráfego. De forma a evitar que o estabelecimento de valores discretos para os equivalentes levassem à formação de descontinuidades nos limites entre esses intervalos [Riente *et al.*, 2008b], os valores dos fatores foram interpolados em função do fluxo de tráfego (ver Tabela 4-1).

4.3 Resultados

Ao final do tratamento de dados, dos 25 pontos de coleta selecionados, foi obtido um total de 788.122 observações, sendo 725.115 correspondentes ao regime não congestionado. As velocidades de fluxo livre estimadas variaram entre 78 km/h e 130 km/h.

A Figura 4-6 mostra as observações de velocidade e taxa de fluxo do sentido norte do km 22,3 da SP-021, após o tratamento de dados, sendo o fluxo de tráfego dado em veículos equivalentes (cp/(h.faixa)) e a velocidade de fluxo livre estimada em 107 km/h. Para a exibição dos pontos, foi empregada uma técnica na qual são atribuídas diferentes tonalidades de acordo com a frequência em que cada ponto foi observado.

Figura 4-6: Observações de velocidade e taxa de fluxo após tratamento – SP-021, km 22,3 norte

Como esperado, há mais observações para baixos fluxos de tráfego. É possível notar também que as regiões centrais da nuvem apresentam maior densidade, sugerindo que, em cada intervalo de fluxos de tráfego, há uma maior frequência de observações próximas à mediana. Esse fenômeno é também ilustrado na Figura 4-7, que mostra histogramas das velocidades observadas na mesma estação, para intervalos de fluxo de tráfego até 300 cp/(h.faixa). Os gráficos indicam que: (1) a variabilidade das velocidades diminui à medida que os fluxos aumentam, para o intervalo considerado; (2) as observações não seguem uma distribuição de frequências perfeitamente simétrica, no entanto, a diferença entre a média e a mediana não

supera 2 km/h em nenhum caso, nem neste sensor ou em qualquer outro usado neste trabalho, sugerindo que essa assimetria é pouco significativa.

Figura 4-7: Histogramas das velocidades observadas por intervalos de fluxo de tráfego

A Tabela 4-1 lista a velocidade de fluxo livre *FFS* estimada, o número de observações para as estações de monitoramento de tráfego usadas neste estudo e a velocidade de transição entre o regime congestionado e não congestionado, para os trechos nos quais a capacidade é atingida. Especificamente com relação à *FFS*, foram estimados valores significativamente inferiores aos demais para as rodovias de pista dupla em área urbana, sendo os maiores valores referentes às vias rurais, especialmente a SP-348 e SP-280, nas quais o limite de velocidade é 120 km/h.

Tabela 4-1: Características do fluxo nos locais observados

km	Sentido	Tipo de via	Ocupação lindeira	FFS (km/h)	Observações	Atinge capacidade	Velocidade de transição (km/h)
SP-348 (Rodovia dos Bandeirantes)							
32	Norte	Autoestrada	rural	116	56.394	Sim	87
47	Norte	Autoestrada	rural	120	50.480	Não	
50	Norte	Autoestrada	rural	124	9.092	Não	
50	Sul	Autoestrada	rural	123	9.751	Não	
59	Norte	Autoestrada	rural	119	12.997	Não	
65	Norte	Autoestrada	rural	130	11.506	Não	
65	Sul	Autoestrada	rural	115	5.449	Não	
87	Norte	Autoestrada	rural	122	37.323	Não	
87	Sul	Autoestrada	rural	121	19.844	Não	
131,7	Norte	Autoestrada	rural	126	68.513	Não	
149,6	Norte	Autoestrada	rural	121	78.946	Não	
SP-021 (Rodoanel Mário Covas Oeste)							
18,3	Norte	Autoestrada	rural	107	44.734	Sim	86
18,3	Sul	Autoestrada	rural	105	36.722	Sim	85
22,3	Norte	Autoestrada	rural	107	50.022	Sim	82
SP-270 (Rodovia Raposo Tavares)							
36,8	Oeste	Rodovia de pista dupla	urbana	83	22.160	Não	
39,9	Leste	Rodovia de pista dupla	urbana	82	34.047	Não	
SP-280 (Rodovia Presidente Castelo Branco)							
16	Oeste	Rodovia de pista dupla	urbana	78	25.857	Não	
18,4	Leste	Autoestrada	urbana	115	2.882	Não	
22,4	Oeste	Autoestrada	urbana	104	27.283	Não	
27	Leste	Autoestrada	urbana	107	34.047	Sim	78
29,5	Leste	Autoestrada	urbana	105	26.797	Sim	75
37	Leste	Rodovia de pista dupla	rural	116	23.244	Sim	92
51,9	Leste	Rodovia de pista dupla	rural	110	31.499	Sim	81
59,6	Leste	Rodovia de pista dupla	rural	119	30.217	Não	
75,9	Oeste	Rodovia de pista dupla	rural	116	38.316	Não	

Por fim, uma primeira análise dos dados de fluxo e velocidade disponíveis mostrou que a divisão adotada pelo HCM (autoestradas e rodovias de pista dupla) faz pouco sentido para as rodovias estudadas. No entanto, notou-se diferença significativa entre os dados coletados nos

trechos rurais e urbanos. No capítulo a seguir, é apresentado um aprofundamento dessa análise, sendo mostrados dados que dão suporte à hipótese aqui posta.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo, foram tratados e analisados os dados de tráfego obtidos pelos sensores selecionados no capítulo anterior. Inicialmente, foram usados procedimentos para a identificação e eliminação de observações inadequadas ao estudo, nas quais são verificados erros relacionados ao processo de coleta dos dados ou a períodos de operação com características fora do escopo do modelo fluxo-velocidade proposto, conforme conceituado pelo HCM.

Para os períodos de coleta válidos, foram usados os dados correspondentes à faixa mais à esquerda da rodovia, na qual o percentual de veículos pesados é o menor possível. O efeito desses veículos é pouco conhecido e os resultados dos estudos existentes ainda preliminares [Cunha e Setti, 2009]. Por fim, para a definição do limite entre a porção congestionada e não congestionada das nuvens de pontos, foi aplicada a análise de *cluster*, através do método *k-means*, que consiste em uma técnica da estatística multivariada que estabelece agrupamentos de objetos individuais em função de critérios de similaridade, neste caso, a distância euclidiana entre as observações de fluxo e velocidade, sendo os dois parâmetros normalizados.

Ao final do tratamento de dados, dos 25 pontos de coleta selecionados, foi obtido um total de 788.122 observações, em intervalos de cinco ou seis minutos. A base de dados usada nos estudos que subsidiaram o HCM 2010, a maior já reunida para a elaboração do manual, soma 5.665 observações [Roess, 2011b], em intervalos de quinze minutos.

A partir dessas observações, foi calculada a média e a mediana das velocidades médias a intervalos de 50 cp/h, para cada ponto de coleta. As velocidades de fluxo livre foram então estimadas como as médias dos valores obtidos para esses intervalos, em condições de baixo fluxo de tráfego (até 350 cp/(h.faixa)). Os valores calculados dessa forma variaram entre 78 km/h e 130 km/h.

5 LIMITES DAS CURVAS FLUXO-VELOCIDADE

Neste capítulo, expõe-se o método usado para a definição dos limites da região convexa do modelo fluxo-velocidade: (1) a densidade na capacidade CD , que reflete a velocidade média da corrente de tráfego nos fluxos máximos observados em condições não congestionadas; e (2) o ponto de transição BP , que consiste no fluxo a partir do qual a velocidade média da corrente de tráfego decresce em função do aumento no fluxo de tráfego.

Primeiramente, é definida a classificação adotada para os trechos estudados. Em seguida, é explicada a formulação matemática usada para o modelo do HCM. Por fim, é apresentado o método usado para a definição de valores representativos para a CD e BP .

5.1 Classificação dos trechos

Conforme apresentado no item 2.3.2, o HCM apresenta conjuntos distintos de curvas fluxo-velocidade para autoestradas e rodovias de pista dupla, com valores distintos de CD e BP . Assim, a primeira etapa da calibração do modelo proposto consiste na forma de classificação dos trechos.

Como citado no capítulo anterior, uma primeira análise dos dados de fluxo e velocidade disponíveis mostrou que a divisão adotada pelo HCM (autoestradas e rodovias de pista dupla) faz pouco sentido para as rodovias estudadas, como explicado a seguir. Uma das possíveis razões para isso pode estar ligada às características das rodovias de pista dupla construídas pelo DER-SP. Diferentemente das *multilane highways* definidas no HCM 2010, as rodovias estudadas não possuem cruzamento em nível, semáforos ocasionais ou retornos pelo canteiro central. Em função disso, a única diferença entre as autoestradas e rodovias de pista dupla convencionais no estado de São Paulo é quanto ao controle dos acessos, conforme

conceituado no item 3.2.1. No entanto, notou-se uma divergência perceptível entre as observações de fluxo e velocidade para as vias de uso urbano e as rodovias rurais.

Como exemplos, a Figura 5-1 e a Figura 5-2 mostram as nuvens de pontos obtidas em estações situadas em trechos classificados como autoestradas segundo os critérios do HCM, com características físicas semelhantes: terreno plano; ausência de curvas acentuadas; três ou mais faixas por sentido; velocidade limite legal de 120 km/h; e fora do efeito de acessos à montante ou à jusante. A Figura 5-1 consiste no sentido norte do km 32 da SP-348, um trecho rural que, mesmo servindo a elevados volumes de tráfego, mantém velocidades médias acima de 100 km/h por hora por um amplo intervalo de fluxos de tráfego.

Por outro lado, Figura 5-2 mostra os pontos referente ao sentido leste do km 29,5 da SP-280, localizada na periferia da região metropolitana da cidade de São Paulo, consistindo em uma das principais ligações urbanas arteriais entre Barueri, Carapicuíba, Osasco e São Paulo. Embora a amostra seja menor, é possível notar uma queda mais precoce e acentuada na velocidade média dos automóveis em função do aumento do volume de tráfego, quando comparado com a figura anterior. A capacidade do trecho também parece ser menor. Aspecto semelhante é verificado nos demais trechos urbanos da pista central e das marginais da SP-280 e na SP-270.

Figura 5-1: Dados coletados na SP-348, km 32 norte, autoestrada em zona rural

Figura 5-2: Dados coletados na SP-280, km 29,5 leste, autoestrada em zona urbana

A porção rural da SP-280 (Figura 5-3) não conta com controle de acessos, sendo classificada como rodovia de pista dupla convencional pelos critérios do HCM. Mesmo assim, suas características operacionais se assemelham às da SP-348, quando comparados trechos com geometria similar (e.g.: SP-280, km 59,6 leste e SP-348, km 87 norte).

Figura 5-3: Dados coletados na SP-280, km 75,9 oeste, rodovia de pista dupla em zona rural A SP-021, que funciona como anel viário da cidade de São Paulo, mescla características verificadas nas vias rurais e urbanas. Embora esteja inserida em área urbanizada, essa via foi concebida para atender ao tráfego rodoviário que normalmente atravessaria a região central de São Paulo, sendo isolada do sistema viário local e acessível somente por trevos. Com efeito, o aspecto dos dados obtidos com os sensores instalados na SP-021 se aproxima mais do verificado para vias rurais.

De fato, a relação entre a inserção de uma via de fluxo não interrompido e as características da corrente de tráfego já foi verificada em outros locais. A análise do banco de dados usado em um estudo conduzido nos EUA [Rakha e Crowther, 2002], que inclui um trecho de autoestrada, um túnel e uma via arterial, mostrou que há uma evidente relação entre a “sensação de atrito” causado pela ocupação lindeira e o comportamento dos motoristas. No HCM 2010, esse efeito é considerado apenas no que tange à estimativa dos fatores que afetam a velocidade de fluxo livre. No entanto, os autores do estudo argumentam que esse fenômeno influi não apenas na velocidade de fluxo livre, como também na forma da curva fluxo-velocidade como um todo. Em oposição ao observado para o trecho de autoestrada, a

velocidade média da corrente de tráfego no túnel e na via arterial era precocemente afetada pelo aumento do volume de tráfego, enquanto os fluxos máximos observados nestas últimas eram tipicamente menores do que os verificados na primeira.

Em outro estudo [Zhao *et al.*, 2009], um modelo calibrado para autoestradas que funcionam na região suburbana de Pequim, China, mostrou queda de velocidade mesmo para baixos volumes de tráfego, de forma que mesmo o modelo parabólico de Greenshields produziu um bom ajuste aos dados empíricos.

Durante a elaboração das curvas usadas no HCM 2010, contrariando a tendência de aumento da capacidade em função da velocidade de fluxo livre, o fluxo máximo para a curva de 120 km/h parecia ser inferior às demais [Roess, 2009b], sem uma razão lógica para isso. Uma das possíveis explicações dos autores do estudo para o fenômeno poderia ser o fato de que os dados usados para a calibração da nova curva são primordialmente provenientes de autoestradas urbanas ou suburbanas, influenciadas pela formação de congestionamentos à jusante, em acessos ao sistema viário local e por particularidades do comportamento dos motoristas.

Dessa forma, este trabalho propõe a elaboração de conjuntos de curvas fluxo-velocidade distintos para rodovias de pista dupla rurais e urbanas, independentemente do tipo de tratamento dos acessos.

Essa decisão faz necessária a definição clara do aspectos que definem um trecho homogêneo como urbano ou rural. Nesse sentido, a Tabela 5-1 mostra as principais características dos trechos estudados, sendo listados os valores mínimos, máximos e médios de cada atributo. Embora a curvatura varie significativamente entre os trechos, em termos relativos, de acordo com os critérios expostos no item 3.4.4, nenhuma das vias estudadas pode ser considerada sinuosa, de modo que é improvável que esse parâmetro explique a diferença observada entre

as duas classes de rodovias. Assim, verifica-se que as principais diferenças entre os conjuntos de trechos residem no espaçamento entre acessos controlados, tipicamente menor para as rodovias urbanas, ou na densidade de acessos não controlados, mais elevadas para as mesmas. Essa característica está diretamente ligada ao tipo de uso do solo e da ocupação lindeira à via.

Tabela 5-1: Características dos trechos estudados em função do tipo de via (urbana ou rural)

Característica	Rodovias rurais			Rodovias urbanas		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
<i>Rise & Fall</i> (m/km)	4	22	42	9	25	41
Curvatura (°/km)	8	37	65	28	62	124
Greide (%)	-4,5	0,1	5,0	-0,5	1,8	5,5
Distância entre acessos controlados (km)	1,5	5,6	12,4	1,1	1,8	2,3
Densidade de acessos não controlados (#/km)	1,0	1,7	2,0	4,0	5,5	7,0

Assim, são apresentadas as definições a seguir para as duas classes propostas de autoestradas e rodovias de pista dupla, sendo os limites dos parâmetros apresentados na Tabela 5-1 estabelecidos como as “condições padrão” dos modelos a serem calibrados neste trabalho:

- a) Rodovias rurais: consistem em vias isoladas do sistema viário local e da ocupação lindeira, acessíveis somente por interseções de grande porte ou acessos ocasionais. Atendem a viagens nas quais há a expectativa de velocidades mais altas;
- b) Rodovias urbanas: consistem em vias que atravessam regiões urbanizadas, conectadas ao sistema viário urbano por acessos frequentes, controlados ou não. Costumam ter limite de velocidade inferior ao das rodovias rurais e servem também a viagens locais.

A Figura 5-4 mostra exemplos de rodovias rurais e urbanas, dentro do universo de trechos estudados neste trabalho. Nos dois casos, a foto superior corresponde a uma autoestrada, enquanto a foto inferior reflete uma rodovia de pista dupla convencional.

Figura 5-4: Exemplos de trechos rurais e urbanos

5.2 Modelo do HCM

Em comparação com seu antecessor, o HCM 2010 apresenta um novo conjunto de curvas fluxo-velocidade para autoestradas. Para rodovias de pista dupla, as curvas se mantiveram inalteradas. Apesar das diferenças, a formulação matemática das curvas é a mesma usada no HCM 2000 [Roess, 2011b], e é examinada a seguir.

Para trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla, o modelo fluxo-velocidade do HCM admite um intervalo inicial de fluxos de tráfego no qual a velocidade média S dos veículos de passeio se mantém igual à velocidade de fluxo livre FFS , conforme apontado por diversos estudos empreendidos entre o fim da década de 1980 e princípio da década de 1990 [Hall e

Agyemang-Duah, 1991; Urbanik II *et al.*, 1991; Banks, 1990; Persaud e Hurdle, 1988; Hall e Hall, 1990; Chin e May, 1991]. No intervalo de fluxos entre o ponto de transição *BP* e a densidade na capacidade *CD*, é definido um modelo convexo (como mostrado anteriormente na Figura 2-3 do item 2.3.2).

Para modelar a porção curva da relação fluxo-velocidade, adota-se uma formulação matemática na qual cada curva é ancorada automaticamente no ponto de transição e na densidade na capacidade [Roess, 2011b]. Esse equacionamento foi apresentado pela primeira vez no HCM 2000, sendo apresentada a seguinte relação de $S = f(FFS; \nu)$ para autoestradas [TRB, 2000]:

$$S = FFS - \left[\frac{1}{28} (23FFS - 1800) \left(\frac{\nu + 15FFS - 3100}{20FFS - 1300} \right)^{2,6} \right], \quad (5.1)$$

em que S e FFS são dados em km/h e o fluxo de tráfego ν , em cp/(h.faixa). Como mostrado na Figura 2-3, são definidas relações lineares entre *BP* e FFS e entre C e FFS :

$$BP = -15FFS + 3100 = a_{BP} FFS + b_{BP}; \quad (5.2)$$

$$C = 5FFS + 1800 = a_C FFS + b_C. \quad (5.3)$$

Substituindo 5.2 e 5.3 em 5.1 e considerando que 28 cp/km é o valor fixado pelo HCM 2000 para a densidade na capacidade *CD*, é possível reformular a relação de S em função de C , CD e *BP*, como:

$$S = FFS - \left(FFS - \frac{C}{CD} \right) \times \left(\frac{\nu - BP}{C - BP} \right)^\gamma, \quad (5.4)$$

em que γ é um coeficiente de calibração. Alternativamente, omitindo-se CD e expressando a mesma relação em termos da velocidade na capacidade CS , tem-se:

$$S = FFS - \left[\frac{(FFS - CS)}{(C - BP)^\gamma} \right] \times (v - BP)^\gamma. \quad (5.5)$$

Para rodovias de pista dupla, a formulação usada é em essência a mesma descrita para autoestradas. No entanto, BP é constante e CD varia para diferentes valores de FFS , de forma que o HCM 2000 apresenta quatro equações, em função da FFS .

No HCM 2010, o modelo para rodovias de pista dupla foi mantido inalterado, sendo a porção $FFS - \frac{C}{CD}$ da equação 5.4 simplificada, dada na forma de uma constante. Para as autoestradas, o modelo foi recalibrado [Roess, 2009b], sendo usada a formulação apresentada pela equação 5.5. Foi obtido um novo valor para γ e ajustada a relação entre BP e FFS , sendo C e CS mantidos conforme apresentado pelo HCM 2000. Em seguida, a equação final foi simplificada sendo a porção $\alpha = \frac{(FFS - CS)}{(C - BP)^\gamma}$ simplificada como uma constante. Como resultado, têm-se as equações mostradas na Tabela 2-1 do item 2.3.2, nas quais γ assume um valor de 2 para autoestradas e 1,31 para rodovias de pista dupla.

A análise descrita anteriormente mostra que, embora o HCM forneça ao usuário equações simplificadas em função de v e FFS , a formulação original consiste verdadeiramente em curvas ancoradas nos pontos notáveis da relação fluxo-velocidade, que consistem no ponto de transição BP e na densidade na capacidade CD , ligada à capacidade C e à velocidade na capacidade CS por meio da relação fundamental do tráfego [Roess, 2011b]. Dessa forma, deve-se inicialmente estimar valores de BP e CD Para se obter um conjunto de curvas fluxo-velocidade para os trechos estudados. Isso é apresentado a seguir.

5.3 Densidade na capacidade CD

Este item mostra o processo empregado para investigar a densidade máxima em condições de fluxo não congestionado, que corresponde ao limite final das curvas fluxo-velocidade. No

HCM 2010, a capacidade não foi revista, por falta de dados adequados para tanto. Assim, dentre os métodos investigados na literatura, é proposta neste estudo a aplicação de um método baseado na identificação dos fluxos e velocidades que tipicamente causam o colapso (*breakdown*) da corrente de tráfego [Brilon *et al.*, 2005; Washburn *et al.*, 2010], que foi desenvolvido e vem sendo constantemente aprimorado por pesquisadores envolvidos no desenvolvimento do HCM e do HBS. A partir dos fluxos e velocidades na capacidade, é derivada a densidade, por meio da relação fundamental do tráfego.

5.3.1 Método

O conceito de colapso da corrente de tráfego pode ser definido como a transição entre um padrão operacional adequado e condições de fluxo congestionado [Brilon *et al.*, 2005]. Em autoestradas, esse fenômeno pode ser identificado quando a velocidade média da corrente de tráfego repentinamente cai abaixo de um nível aceitável. Sob essa premissa, a capacidade pode ser definida como o fluxo máximo que pode ser atingido antes que ocorra o colapso do sistema. Este fenômeno intrinsecamente apresenta natureza estocástica.

O método usado foi originalmente desenvolvido baseado em uma analogia com análises de ciclo de vida e confiabilidade, usando para a estimativa da função de sobrevivência o método não paramétrico de Kaplan e Meier [1958], “*Product Limit Method*” (PLM).

Reescrevendo a função $F_c(q)$ do método PLM em termos de variáveis de tráfego, tem-se:

$$F_c(v) = 1 - \prod_{i: v_i \leq v} \frac{k_i - d_i}{k_i}; i \in \{B\}, \quad (5.6)$$

em que: v : fluxo de tráfego, em cp/h;
 v_i : fluxo de tráfego no intervalo i , em cp/h;
 k_i : número de intervalos nos quais $v > v_i$;
 d_i : número de colapsos no fluxo v_i ; e

$\{B\}$: conjunto de observações com colapso.

Para aplicar o método proposto, é necessário dispor de observações para intervalos curtos de tempo. Neste estudo, conta-se com dados agrupados em intervalos de cinco ou seis minutos, sendo um valor em torno de cinco minutos o ideal, de acordo com a literatura consultada [Brilon e Zurlinden, 2003]. Dispondo da base de dados tratados e ordenados cronologicamente, as observações foram inicialmente classificadas nos seguintes conjuntos:

- $\{F\}$: O tráfego flui em regime não congestionado no intervalo i e $i+1$. Isso indica que i provavelmente não corresponde à capacidade do trecho;
- $\{B\}$: O tráfego flui em regime não congestionado no intervalo i , mas o fluxo observado causa um colapso, indicado por uma queda na velocidade média da corrente de tráfego abaixo de um limite preestabelecido no intervalo $i+1$;
- $\{C1\}$: O tráfego está congestionado no intervalo i , fluindo abaixo da velocidade limite. Este conjunto não fornece qualquer indicação acerca da capacidade do trecho, e pode ser desprezado; ou
- $\{C2\}$: O tráfego flui normalmente no intervalo i , mas o fluxo observado causa um colapso. No entanto, diferentemente da classificação $\{B\}$, o tráfego está congestionado em uma seção de controle a jusante. Neste caso, o colapso pode se dar devido à propagação das filas formadas a partir do congestionamento à jusante. Assim como o conjunto $\{C1\}$, estes dados devem ser desprezados.

Colapsos ligados a fluxos inferiores a 1000 cp/(h.faixa) são associados a incidentes na via [Washburn *et al.*, 2010] e incluídos no grupo $\{F\}$. Além disso, um valor só pode ser incluído no grupo $\{B\}$ se seguido imediatamente por mais de um intervalo de observações no grupo $\{C1\}$. Da mesma maneira, considerou-se que o tráfego se recuperou do regime congestionado apenas quando verificado mais de um intervalo de operação em $\{F\}$, após um período de fluxo em $\{C1\}$.

Para formar o conjunto $\{C2\}$, é necessário dispor de pontos de controle a jusante. Dos oito pontos nos quais a capacidade é atingida, em quatro há um outro sensor passível de ser utilizado como controle, como mostra a Tabela 5-2.

Tabela 5-2: Sensores usados como pontos de controle

Sensor (km)	Sentido	Ponto de controle (km)
SP-021 (Rodoanel Mário Covas Oeste)		
18,3	Sul	22,3
22,3	Norte	18,3
SP-280 (Rodovia Presidente Castelo Branco)		
27	Leste	24,5
29,5	Leste	27

Com relação à velocidade limite, Brilon *et al.* [2005] sugeriram que o valor de 70 km/h se mostra representativo para autoestradas alemãs, mas ressaltam que valores diferentes podem ser encontrados em outros locais. Para rodovias canadenses, por exemplo, foi verificado um limite de aproximadamente 90 km/h [Lorenz e Elefteriadou, 2001].

Neste estudo, considerou-se como limite as velocidades correspondentes à transição entre o regime congestionado e o não congestionado, obtidas para cada sensor através do método descrito no capítulo 4. As velocidades de transição podem ser conferidas na Tabela 4-1.

A partir dos dados classificados nos referidos grupos, foi possível estimar a função de sobrevivência para cada trecho usando a técnica PLM. No entanto, a função completa de distribuição de probabilidades só é obtida quando todos os maiores valores observados pertencem ao grupo $\{B\}$. Tal fenômeno raramente é verificado, de modo que se faz necessário ajustar um modelo matemático à $F_c(v)$. Nesse sentido, a literatura [Brilon *et al.*, 2005; Washburn *et al.*, 2010] sugere que a distribuição de Weibull representa bem a função de sobrevivência.

Destaca-se que, nesta abordagem, a capacidade da via não é determinística, mas varia segundo uma distribuição de Weibull, de forma estocástica. No entanto, muitas vezes é desejável estabelecer um valor representativo para a capacidade, como no HCM. Isso é feito a partir da definição da probabilidade máxima de colapso admissível, sendo o fluxo de tráfego relacionados a tal percentual determinado como a capacidade teórica do trecho.

Nesse sentido, para rodovias alemãs, a diretriz de projeto fornecida por Geistefeldt [2008] é estabelecida como o 3º percentil da distribuição de probabilidades. Isso significa que é estabelecido como valor representativo da capacidade um fluxo no qual a probabilidade de colapso é de 3%. Em um estudo mais amplo, Washburn *et al.* [2010] compararam três métodos para a definição da capacidade em rodovias dos EUA, recomendando que o 4º percentil da distribuição de Weibull pode produzir estimativas razoáveis da capacidade em um trecho. Assim, neste estudo, optou-se por utilizar o valor de 4% de probabilidade de colapso como regra geral, conforme recomendado recentemente por Washburn *et al.* [2010].

Para cada trecho avaliado, foram verificadas as velocidades associadas ao fluxo na capacidade, sendo a velocidade na capacidade definida como a média das velocidades dessas observações. A partir da capacidade e da velocidade na capacidade, foram estabelecidos os valores aproximados para a densidade na capacidade, por meio da relação fundamental do tráfego.

5.3.2 Resultados

O método descrito no item anterior foi aplicado aos oito pontos de coleta nos quais se verificam que a capacidade é atingida, sendo dois em rodovias classificadas como urbanas e seis como rurais. Em uma primeira análise, não foi verificada diferença aparente entre os resultados obtidos para os locais que contam com um ponto de controle a jusante (nos quais é

possível formar o conjunto C2) e os demais, de forma que todos os oito pontos foram considerados para análise posterior.

A Figura 5-5 mostra dados referentes ao sentido norte do km 22,3 da SP-021 que situa após a junção da SP-021 com a SP-270. O mesmo gráfico apresenta ainda a distribuição de Weibull calibrada sobre os pontos obtidos através do modelo PLM. O fluxo correspondente ao 4º percentil é de 2.250 cp/(h.faixa) e a velocidade média nessa condição, 90 km/h, sendo esse ponto destacado no gráfico. Por meio da relação fundamental do tráfego, a densidade na capacidade pode ser calculada como 25,0 cp/(km.faixa).

Figura 5-5: Modelo PLM e distribuição de Weibull – SP-021, km 22,3 norte

Após a aplicação do método nos oito pontos de coleta, foi verificada se existia relação marcante entre os valores obtidos para a capacidade C e densidade na capacidade CD com as características dos trechos, a saber: greide; curvatura; espaçamento entre acessos; e número de faixas. Verificou-se claramente uma tendência de queda em C e CD para aclives, em função da inclinação i , conforme mostrado na Figura 5-6. Para rampas inferiores a 4%, no entanto, os valores obtidos para CD não variaram significativamente, oscilando entre 25 e 27 cp/(km.faixa), enquanto C variou entre 2000 e 2500 cp/h/faixa, aproximadamente.

Figura 5-6: Efeito da inclinação do greide i na densidade na capacidade CD

O efeito do greide nessa análise pode estar ligado ao impacto da geometria vertical no desempenho dos automóveis ou ao comportamento dos motoristas no estado de São Paulo, ou ainda ao impacto causado pelos veículos pesados nas faixas à direita ou a jusante do ponto de coleta. Embora a amostra estudada (oito trechos) não seja suficiente para que sejam tecidas conclusões sobre o efeito da inclinação das rampas sobre a densidade na capacidade, decidiu-se por desconsiderar aclives acima de 4% de inclinação, sendo recomendada para o futuro uma pesquisa mais detalhada sobre o assunto, levando em conta o possível efeito combinado entre inclinação e extensão do aclive. A Tabela 5-3 lista os valores encontrados para C , CS e CD , para cada trecho.

Tabela 5-3: Capacidade, velocidade na capacidade e densidade na capacidade por trecho

km	Sentido	Tipo de via	Ocupação lindeira	FFS (km/h)	C (cp/(h.faixa))	CS (km/h)	CD (cp/(km.faixa))
SP-348 (Rodovia dos Bandeirantes)							
32	Norte	Autoestrada	rural	116	2.400	93	26
SP-021 (Rodoanel Mário Covas Oeste)							
18,3	Norte	Autoestrada	rural	107	2250	88	26
18,3	Sul	Autoestrada	rural	105	2230	88	25
22,3	Norte	Autoestrada	rural	107	2320	90	26
SP-280 (Rodovia Presidente Castelo Branco)							
27	Leste	Autoestrada	urbana	107	2130	80	27
29,5	Leste	Autoestrada	urbana	105	2130	80	27
37	Leste	Rodovia de pista dupla	rural	116	1950	96	20
51,9	Leste	Rodovia de pista dupla	rural	110	1975	88	22

Assim, estimou-se inicialmente o valor médio de CD de 26 cp/(km.faixa) para as vias rurais e 27 cp/(km.faixa) para as vias urbanas. Trata-se de valores próximos entre si e aos limites

apresentados pelo HCM 2010 para autoestradas e rodovias de pista dupla, no qual CD varia entre 25 e 28 cp/(km.faixa). O valor ligeiramente inferior obtido para as vias rurais está diretamente ligado à prática de maiores velocidades na capacidade, a despeito de a capacidade ter se mostrado tipicamente superior quando comparado com as rodovias urbanas.

5.4 Ponto de transição *BP*

Neste item, é apresentado o método utilizado para investigar os pontos de transição, que definem o fluxo a partir do qual a velocidade média da corrente de tráfego reduz-se em função do aumento no fluxo de tráfego, e constituem o ponto inicial da porção curva do modelo fluxo-velocidade. Para tanto, é proposta uma aplicação da abordagem empregada nos estudos que subsidiaram a elaboração do HCM 2010 [Roess, 2009b; Roess, 2011b].

Para a elaboração do HCM 2010, foram agrupados os dados de todos os pontos de coleta com velocidades de fluxo livre próximas entre si. No entanto, Roess [2011b] mostrou que essa base de dados não foi capaz de produzir resultados estatisticamente satisfatórios. Buscando testar o método proposto por Roess [2011b] sob uma nova ótica, neste estudo optou-se por aplicar a abordagem proposta para cada ponto de coleta individualmente, analisando-se os resultados posteriormente.

5.4.1 Método

A premissa básica da abordagem proposta é a de que, supondo-se que há uma porção da relação fluxo-velocidade na qual a velocidade se mantém constante e igual à velocidade de fluxo livre FFS , é possível avaliar o desvio padrão das velocidades medidas em torno de FFS .

Dessa forma, para intervalos de fluxo de 50 cp/h, a partir de 200 cp/h, foi calculado o desvio padrão σ das velocidades observadas x_i em relação à FFS :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - FFS)^2}{N}}, \quad (5.7)$$

sendo N o total de observações de velocidade no regime não congestionado, dentro de cada intervalo de fluxos.

Em Roess [2011b], BP foi determinado a partir da observação dos gráficos das relações fluxo- σ . Neste trabalho, de modo a automatizar a análise e estabelecer um critério objetivo para a determinação de BP , optou-se por sistematizar o método por meio do ajuste de uma função sobre a relação fluxo- σ . Dentre as equações testadas, verificou-se que o polinômio de terceiro grau foi o que produziu o melhor ajuste, medido através dos valores obtidos para o R^2 em cada caso, representando a relação fluxo- σ de maneira simplificada para todas as estações. Para cada ponto de coleta, considerou-se como o ponto de transição BP o fluxo a partir do qual a derivada do polinômio se torna positiva, denotando o princípio do aumento no desvio padrão em torno de FFS .

O método descrito pode ser aplicado aos 25 pontos de coleta selecionados, pois como é possível aplicar o método inclusive para os pontos que não atingem a capacidade, toda a base de dados pode ser avaliada nesta análise.

5.4.2 Resultados

Verificou-se que os pontos de transição são tipicamente maiores para as rodovias rurais, quando comparadas às rodovias urbanas. Como exemplo, a Figura 5-7 e a Figura 5-8 mostram o polinômio obtido a partir dos desvios padrão das velocidades observadas em torno de FFS para duas estações na SP-280, destacando-se BP sobre a nuvem de pontos. Os dois trechos possuem parâmetros geométricos muito próximos entre si e três faixas por sentido. Entretanto, o primeiro se situa em área rural, sendo verificado um valor de 670 cp/h para BP . No segundo, situado na região metropolitana de São Paulo, BP foi estimado como 409 cp/h.

Figura 5-7: *BP* e desvio padrão da velocidade em torno de *FFS* – SP-280, km 59,6 leste

Figura 5-8: *BP* e desvio padrão da velocidade em torno de *FFS* – SP-280, km 29,5 leste

Após a aplicação do método para todos os pontos de coleta, foi analisada a relação entre os valores estimados para *BP* e as características dos trechos. Ao contrário do verificado para a capacidade *C* e densidade na capacidade *CD*, não se observou qualquer relação entre a geometria vertical e o ponto de transição, de forma que os resultados obtidos para todos os pontos puderam ser considerados.

A Figura 5-9 mostra a análise da relação entre o ponto de transição e a velocidade de fluxo livre FFS para as rodovias rurais. Como no modelo do HCM 2010 de autoestradas (*freeways*), foi identificada uma tendência de diminuição de BP com o aumento de FFS . O ajuste de uma linha de tendência, como a usada pelo manual americano, produziu um $R^2 = 0,55$ e a equação:

$$BP = -10,4FFS + 1816. \quad (5.8)$$

Para rodovias urbanas (Figura 5-10), como no modelo do HCM para rodovias de pista dupla convencionais (*multilane highways*), o R^2 foi ligeiramente superior (0,59) e a equação proposta assume a forma:

$$BP = -5,2FFS + 1001. \quad (5.9)$$

Nos dois casos, os valores encontrados foram significativamente inferiores aos apresentados pelo HCM. Essa conclusão corrobora os estudos que subsidiaram a versão atual do manual americano, que mostraram que embora a porção de velocidade constante do modelo fluxo-velocidade exista de fato, ela não se estende tanto quanto se acreditava [Roess, 2011b], de modo que o HCM 2010 apresenta valores de BP menores para autoestradas do que o HCM 2000.

Figura 5-9: Tendência de redução de BP com o aumento de FFS em rodovias rurais

Figura 5-10: Tendência de redução de *BP* com o aumento de *FFS* em rodovias urbanas

5.5 Limites das curvas

Neste capítulo, foram estabelecidos, para rodovias rurais e urbanas, valores para os limites da porção convexa do modelo fluxo-velocidade. Com a intenção de facilitar o uso do modelo calibrado, considerou-se conveniente arredondar os coeficientes usados para se determinar o ponto de transição *BP* (equação 5.8), e adotar o valor para a densidade na capacidade *CD* como 27 cp/(km.faixa) para ambos os tipos de rodovias, como resumido na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Limites das curvas fluxo-velocidade

Grupo	<i>CD</i> (cp/(km.faixa))	<i>BP</i> (cp/(h.faixa))
Rodovias rurais	27	$-10FFS + 1800$
Rodovias urbanas	27	$-5FFS + 1000$

No capítulo seguinte, será detalhado o método empregado para ajustar um conjunto coerente de curvas fluxo-velocidade para os dois grupos propostos, dentro dos limites estabelecidos neste capítulo.

5.6 Considerações finais

Foram investigados os limites para a porção curva do modelo fluxo-velocidade. Esse objetivo envolveu a definição da classificação a ser adotada para os trechos e a investigação da densidade na capacidade *CD* e do ponto de transição *BP*.

Para a investigação da capacidade C e da densidade na capacidade CD , foi aplicado um método baseado na identificação dos fluxos e velocidades que frequentemente causam o colapso (*breakdown*) de um trecho [Brilon *et al.*, 2005; Washburn *et al.*, 2010]. A partir dos fluxos e velocidades na capacidade, é derivada a densidade, por meio da relação fundamental do tráfego.

Por fim, foi apresentado o método utilizado para investigar os pontos de quebra BP , que constituem o ponto inicial da porção curva do modelo fluxo-velocidade. Para tanto, é proposto uma aplicação da abordagem empregada nos estudos que subsidiaram a elaboração do HCM 2010 [Roess, 2009b; Roess, 2011b]. O método foi aplicado para cada ponto de coleta individualmente, sendo os resultados avaliados em seguida.

Como resultado, foram estabelecidos os limites da porção convexa do modelo fluxo-velocidade a ser calibrado, usando o método explicado no capítulo a seguir.

6 RELAÇÃO ENTRE FLUXO E VELOCIDADE

Neste capítulo, apresenta-se um modelo para região convexa da relação fluxo-velocidade. Nos estudos que subsidiaram a elaboração do HCM 2010 [Roess, 2009b], foram ajustadas funções individuais para quatro conjuntos de dados agrupados segundo a velocidade de fluxo livre, que foi estimada a partir dos dados de tráfego ou com o uso de um carro teste. Em seguida, essas funções preliminares foram manipuladas visualmente, a fim de produzir o que se chamou “um conjunto coerente” de modelos fluxo-velocidade [Roess, 2011b].

Neste trabalho, foi obtido um conjunto de funções para a região convexa do modelo fluxo-velocidade, para as rodovias estudadas, por meio da calibração simultânea do modelo usado no HCM para todos os pontos de coleta, considerando as velocidades de fluxo livre obtidas no Capítulo 4.

6.1 Calibração

A premissa básica do método usado para a calibração do modelo fluxo-velocidade consiste na busca dos coeficientes capazes de minimizar o erro total em relação às observações, considerando todos os sensores simultaneamente.

Para tanto a maior parte dos sensores selecionados puderam ser considerados, posto que mesmo aqueles que não atingem a capacidade podem fornecer indicações a respeito do formato de parte das curvas. Foram excluídos dessa análise apenas os trechos em que existe acentuação (maior que 4%) que, conforme explicado no item 5.3, apresentam valores significativamente diferentes para a densidade na capacidade.

Para cada ponto de coleta, foi inicialmente obtido o número de observações a intervalos de 50 cp/h, para toda a gama de fluxos observados. Em seguida, para os intervalos com mais de 10 observações, foram calculadas as médias e medianas das velocidades medidas. Dessa forma,

os 25 pontos de coleta válidos geraram 957 valores de média e mediana, sendo 237 em rodovias urbanas e 720 em vias rurais.

Em seguida, como em outros estudos [Rakha e Arafeh, 2010; Sun *et al.*, 2010], foi montado um problema de otimização, cujo objetivo é a minimização do quadrado dos erros entre a velocidade prevista pelo modelo proposto e as medianas das observações, para cada um dos 957 intervalos válidos. Sendo os limites das curvas BP e CD fixos, as incógnitas do problema são três:

- Os coeficientes a_C e b_C , que definem o ponto de conexão entre as curvas e a densidade máxima na Equação 5.3:

$$C = a_C FFS + b_C; \text{ e}$$

- O expoente γ , que define a concavidade das curvas na Equação 5.4:

$$S = FFS - \left(FFS - \frac{C}{CD} \right) \times \left(\frac{v - BP}{C - BP} \right)^\gamma.$$

De forma a manter criar um conjunto de curvas fluxo-velocidade de “aspecto consistente” (ou seja, com formatos similares), as seguintes restrições devem ser obedecidas:

- γ deve ser maior do que 1 e constante entre as curvas, garantindo uma forma convexa e um mesmo formato para todas as funções do conjunto;
- BP deve ser constante ou ser uma função de FFS , como a encontrada no capítulo anterior para autoestradas; e
- C e CS devem também ser uma função de FFS .

Para resolver o problema proposto, foi empregado um algoritmo de otimização não linear (*GRG – Generalized Reduced Gradient*). De modo a evitar que soluções locais fossem aceitas como o resultado final, o método foi replicado usando dez sementes diferentes, sendo adotada a melhor solução obtida.

É importante ressaltar que o uso de indicadores estatísticos a intervalos regulares, em detrimento das observações brutas, elimina um risco inerente aos métodos de regressão. Caso se disponha de amostras maiores em determinadas regiões da relação a ser ajustada, há uma tendência à criação de distorções nas regiões com menos observações [Bassan e Polus, 2010]. A abordagem utilizada neste trabalho garante duas condições: (1) cada intervalo de fluxos observados tem um peso igual no ajuste da curva; (2) os pontos de coleta com uma gama mais completa de fluxos de tráfego passam a ter um peso maior na calibração do modelo, em relação às estações com menor gama de fluxos observados. A Figura 6-1 mostra exemplos de médias e medianas das observações de velocidade, por intervalo de fluxos, para três dos trechos estudados.

Figura 6-1: Médias e medianas das observações de velocidade, por intervalo de fluxo

6.2 Estudo da relação fluxo-velocidade para os locais estudados

O método descrito no item anterior foi aplicado tanto para rodovias rurais como para urbanas.

O erro médio obtido para rodovias rurais e urbanas foi calculado como:

$$Erro = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Vel_{obs,i} - Vel_{est,i})^2, \quad (6.1)$$

em que n é o número de intervalos de 50 veíc/(h.faixa) usados. “ $Vel_{obs,i}$ ” é a média ou a mediana das velocidades observadas em campo a cada intervalo de 50 cp/(h.faixa); “ $Vel_{est,i}$ ” é a velocidade estimada em cada caso com o uso do modelo a ser calibrado. Ambos os valores são atribuídos ao centro do intervalo de 50 cp/(h.faixa). A Tabela 6-1 mostra os erros calculados com o uso do modelo do HCM 2010, comparado aos valores obtidos após a aplicação do algoritmo de otimização. Para os dois tipos de rodovias, o erro correspondente ao modelo calibrado refletiram, respectivamente, reduções de 60% e 90% em relação ao uso direto do modelo usado no HCM 2010.

Tabela 6-1: Erro quadrático médio associado ao modelo calibrado e o usado no HCM

Grupo	Modelo do HCM	Modelo calibrado	Redução
Rodovias rurais	7,6	3,0	60%
Rodovias urbanas	27,0	2,7	90%

De acordo com o modelo proposto, em rodovias rurais com velocidade de fluxo livre FFS entre 120 e 90 km/h, as velocidades médias da corrente de tráfego para um fluxo de tráfego v pode ser estimada por:

$$S = \begin{cases} FFS, se & v \leq -10FFS + 1800 \\ FFS - \left(FFS - \frac{C}{27} \right) \times \left[\frac{v - (-10FFS + 1800)}{C - (-10FFS + 1800)} \right]^{1,5}, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (6.2)$$

sendo que a capacidade C é dada por:

$$C = 10FFS + 1350, \quad (6.3)$$

e FFS é a média das velocidades observadas para automóveis na faixa mais próxima do canteiro central para fluxos inferiores a 500 veíc/(h.faixa).

Para os trechos classificados como rodovias urbanas, com FFS entre 110 e 80 km/h, BP assume o valor constante de 500 cp/h e a velocidade média da corrente de tráfego S para um fluxo v pode ser estimada por:

$$S = \begin{cases} FFS, & \text{se } v \leq 500 \\ FFS - \left(FFS - \frac{C}{27} \right) \times \left[\frac{v - (500)}{C - (500)} \right]^{1.3}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.4)$$

sendo que:

$$C = 15FFS + 650. \quad (6.5)$$

A Tabela 6-2 e a Tabela 6-3 mostram um resumo dos valores obtidos para os pontos notáveis da relação fluxo-velocidade, para o modelo calibrado e o HCM 2010, em função da velocidade de fluxo livre. A primeira contém os valores para rodovias rurais paulistas e *freeways* norte-americanas enquanto a segunda se refere às rodovias urbanas e *multilane highways*. Nota-se que os valores estimados para C via algoritmo de otimização são ligeiramente superiores aos estimados através do método PLM (até 10%, em média), considerando-se o fluxo referente ao 4º percentil da distribuição de Weibull como a capacidade do trecho.

Tabela 6-2: Comparação entre os valores estimados com o modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla rurais e os valores do HCM 2010 para *freeways*

FFS (km/h)	Ponto de transição BP (cp/h)		Capacidade C (cp/h)		Velocidade na capacidade CS (km/h)	
	Estimado	HCM 2010	Estimado	HCM 2010	Estimado	HCM 2010
120	600	1.000	2.550	2.400	94	86
110	700	1.200	2.450	2.350	91	84
100	800	1.400	2.350	2.300	87	82
90	900	1.600	2.250	2.250	83	80

Tabela 6-3: Comparação entre os valores estimados com o modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla urbanas e os valores do HCM 2010 para *multilane highways*

FFS (km/h)	Ponto de transição BP (cp/h)		Capacidade C (cp/h)		Velocidade na capacidade CS (km/h)	
	Estimado	HCM 2010	Estimado	HCM 2010	Estimado	HCM 2010
110	500	-	2.300	-	90	-
100	500	1.400	2.150	2.200	84	88
90	500	1.400	2.000	2.100	78	81
80	500	1.400	1.850	2.000	72	74

6.3 Verificação da adequação do modelo proposto às rodovias paulistas

A Figura 6-2 e a Figura 6-3 mostram, respectivamente, as observações de fluxo e velocidade para sensores da SP-348 e SP-021, bem como as médias das observações de velocidade a intervalos de 50 cp/h. Esses gráficos apresentam também as curvas fluxo-velocidade obtidas com o modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla de zonas rurais e as curvas correspondentes do HCM 2010 para *freeways*. Conforme pode ser visto, os modelos são relativamente próximos entre si, sendo as principais diferenças o ponto de transição *BP* a velocidade na capacidade *CS*. A aplicação do modelo usado no HCM 2010 superestima o valor de *BP* e subestima o valor de *CS* para essas duas rodovias. As capacidades estimadas pelo modelo proposto são ligeiramente mais altas que as encontradas usando-se o modelo do HCM 2010.

Figura 6-2: Curvas fluxo-velocidade para a SP-348, km 32 norte, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010

Figura 6-3: Curvas fluxo-velocidade para a SP-021, km 18,3 sul, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010

A Figura 6-4 e a Figura 6-5, por sua vez, mostram exemplos de curvas fluxo-velocidade para estações em rodovias classificadas como urbanas: SP-280 e SP-270, respectivamente. A comparação com o modelo do HCM aplicável em cada caso sugere que o modelo fluxo-velocidade do manual americano diverge dos dados coletados nas rodovias urbanas da amostra, tanto no que tange ao ponto de transição *BP*, à capacidade *C* e à velocidade média da corrente de tráfego para fluxos superiores a 500 cp/(h.faixa).

Figura 6-4: Curvas fluxo-velocidade para a SP-280, km 29,5 leste, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010

Figura 6-5: Curvas fluxo-velocidade para a SP-270, km 36,8 oeste, obtidas com o modelo proposto e o usado no HCM 2010

Além dos exemplos mostrados neste item, o Apêndice A mostra os resultados obtidos para as demais estações de coleta de dados de tráfego.

Foram também comparados os níveis de serviço estimados usando o modelo proposto e o adotado pelo HCM. Para cada um dos 237 intervalos de fluxo de tráfego em rodovias urbanas e para os 720 intervalos em rodovias rurais para os quais se dispunha de dados, o nível de

serviço foi estimado diretamente a partir dos dados coletados, conforme a prática adotada nas rodovias concedidas do estado de São Paulo [ARTESP, 2004]. Para tanto, a cada intervalo, foi calculada a densidade média da corrente de tráfego, por meio da relação fundamental do tráfego ($v = SD$), considerando-se S como a mediana das velocidades médias observadas e v , o ponto médio do intervalo de fluxos. A partir da densidade D calculada através da expressão $D = v/S$, foi determinado o nível de serviço, segundo o critério do HCM 2010. Este nível de serviço foi admitido como o nível de serviço que efetivamente existia na rodovia (“real”).

Um procedimento semelhante foi aplicado, considerando porém as velocidades estimadas pelo modelo proposto e pelo usado no HCM. Os níveis de serviço estimados usando cada modelo foram comparados ao nível de serviço real. A Figura 6-6 resume a comparação em função do tipo de rodovia. Para rodovias rurais, a estimativa feita pelo modelo calibrado foi igual ao nível de serviço “real” em 98% dos casos, enquanto que, para as estimativas do nível de serviço usando o modelo do HCM 2010, somente em 92% dos casos houve a coincidência. Para rodovias urbanas, a diferença foi maior: 96% para o modelo proposto e 86% para o modelo do HCM 2010, respectivamente.

Figura 6-6: Níveis de acerto das estimativas de nível de serviço obtidas através do modelo proposto e através do modelo usado no HCM 2010

6.4 Relação entre fluxo e velocidade

A Figura 6-7 mostra o conjunto de curvas obtido para rodovias rurais, enquanto a Figura 6-8 mostra as curvas obtidas para rodovias urbanas, considerando-se os limites estabelecidos no capítulo 5. Como a base de dados disponível não continha trechos com velocidade de fluxo livre igual ou próxima a 90 km/h, a curva de 90 km/h mostrada na Figura 6-7 consiste em uma extrapolação, usando o equacionamento calibrado para o modelo como um todo. Para rodovias urbanas, a curva para 90 km/h foi interpolada (Figura 6-8). Os modelos matemáticos para as curvas fluxo-velocidade são aqueles apresentados no item 6.2. Para rodovias rurais, tem-se:

$$S = \begin{cases} FFS, se & v \leq -10FFS + 1800 \\ FFS - \left(FFS - \frac{C}{27} \right) \times \left[\frac{v - (-10FFS + 1800)}{C - (-10FFS + 1800)} \right]^{1.5}; & C = 10FFS + 1350. \end{cases}$$

Para rodovias urbanas, com FFS entre 110 e 80 km/h, o ponto de transição BP assume o valor constante de 500 cp/h e a velocidade média da corrente de tráfego S para um fluxo v pode ser estimada por:

$$S = \begin{cases} FFS, se & v \leq -5FFS + 1000 \\ FFS - \left(FFS - \frac{C}{27} \right) \times \left[\frac{v - (-5FFS + 1000)}{C - (-5FFS + 1000)} \right]^{1.3}; & C = 15FFS + 650. \end{cases}$$

A comparação das curvas propostas indica que a velocidade média da corrente de tráfego nas rodovias urbanas apresenta uma queda mais precoce e acentuada do que a observada nas correntes de tráfego em rodovias rurais. Além disso, embora a densidade na capacidade CD usada seja a mesma entre os grupos, os valores estimados para a capacidade C e para a velocidade na capacidade CS para as rodovias urbanas são sistematicamente inferiores aos estimados para as rodovias rurais.

Figura 6-7: Curvas fluxo-velocidade propostas para rodovias rurais

Figura 6-8: Curvas fluxo-velocidade propostas para rodovias urbanas

Na Figura 6-9, comparam-se as curvas propostas com as do modelo do HCM 2010. É possível notar que o modelo calibrado para rodovias urbanas guarda um aspecto semelhante ao modelo do HCM *multilane highways*, apresentando, como principal diferença, valores significativamente inferiores para *BP*, o fluxo a partir do qual se nota um declínio da velocidade em função do aumento da densidade da corrente de tráfego.

Figura 6-9: Comparação entre o modelo proposto para rodovias urbanas e modelo do HCM 2010 para rodovias de pista dupla (*multilane highways*)

O modelo proposto para vias rurais, por sua vez, possui um aspecto semelhante ao apresentado pelo HCM para *freeways*, como pode ser visto na Figura 6-10. Novamente, uma das principais diferenças observadas foi em *BP*, que embora siga a mesma lógica do manual americano, se mostrou tipicamente menor para as rodovias pesquisadas. Outro ponto de destaque é que, embora os valores da capacidade sejam parecidos entre o modelo do HCM e o calibrado, a velocidade na capacidade *CS* é superior nas rodovias paulistas.

Figura 6-10: Comparação entre o modelo proposto para rodovias rurais e modelo do HCM 2010 para autoestradas (*freeways*)

6.5 Considerações finais

Após a determinação dos limites do modelo fluxo-velocidade escolhido, procedeu-se a calibração das curvas fluxo-velocidade para rodovias rurais e urbanas. Seguindo recomendações tecidas pelos autores envolvidos no desenvolvimento do HCM 2010 [Roess, 2011b], optou-se por calibrar o conjunto de curvas como um todo. Para tanto, foi montado um problema de otimização no qual a função objetivo busca minimizar o erro global para todos os pontos de coleta simultaneamente, considerando as velocidades de fluxo livre calculadas a partir dos dados.

Como resultado, foram produzidos, para as rodovias rurais e urbanas, modelos fluxo-velocidade de “aspecto coerente”, quando vistos um todo, sem a necessidade de procedimentos adicionais de ajuste visual. Foram fornecidos os gráficos e as equações das curvas, sendo mostrados exemplos da aplicação do modelo proposto sobre os dados, em comparação com o modelo do HCM 2010.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo tem como meta propor valores representativos para a capacidade e conjuntos de curvas fluxo-velocidade para autoestradas e rodovias de pista dupla do estado de São Paulo. De modo a atingir a meta e os objetivos específicos deste trabalho, foi proposto um método, que consiste das seguintes etapas:

1. Obter dados para trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla com condições “padrão”, aqui definidas como as características mostradas na Tabela 5-1;
2. Determinar a velocidade de fluxo livre FFS , capacidade C e velocidade na capacidade CS para cada trecho estudado;
3. Verificar a adequabilidade da classificação preconizada pelo HCM 2010, entre autoestradas e rodovias de pista dupla, para a amostra estudada, propondo um novo agrupamento, se pertinente; e
4. Obter modelos fluxo-velocidade calibrados para os grupos definidos na etapa anterior e compará-los aos usados pelo HCM 2010.

Como todas as etapas foram concluídas com sucesso, pode-se afirmar que o objetivo proposto foi alcançado. A seguir, são resumidas as principais conclusões e tecidas recomendações para estudos futuros.

7.1 Conclusões

A revisão da literatura mostrou que não há consenso acerca da modelagem matemática ideal para descrever a relação fluxo-velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla, e que as curvas são construídas a partir de dados empíricos coletados em trechos de rodovias onde existe um conjunto de condições previamente estipuladas (as chamadas “condições padrão”). Decidiu-se por manter uma estrutura similar à do HCM 2010, que usa curvas empíricas

baseadas em dados obtidos em trechos rodoviários com uma ampla gama de características físicas e operacionais.

Os estudos que subsidiaram a elaboração da versão atual do manual americano se basearam principalmente em análises de regressão, sendo ajustadas individualmente curvas para conjuntos de pontos construídos a partir do agrupamento de observações advindas de trechos com velocidades de fluxo livre aproximadas entre si. No entanto, essa abordagem não produziu um modelo de “aspecto coerente”, quando o conjunto de curvas é visto com um todo [Roess, 2011b], o que levou à decisão de ajustar o modelo visualmente [Roess, 2011a]. Como, por falta de recursos, na elaboração do HCM 2010, o método para rodovias de pista dupla não foi revisto, o modelo produzido para autoestradas deveria, para um mesmo fluxo de tráfego, produzir velocidades médias superiores às do modelo para rodovias de pista dupla, ainda que em discordância com evidências empíricas [Roess, 2011b].

Neste estudo, adotou-se uma abordagem baseada na calibração do modelo fluxo-velocidade como um todo, usando simultaneamente trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla. Inicialmente, foi desenvolvido um método para selecionar trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla para os quais há a disponibilidade de dados de tráfego. Como resultado do processo empreendido, dos 76 pontos de coleta iniciais, 25 se mostraram efetivamente adequados a serem usados para a coleta de dados a serem utilizados neste estudo.

Alternativamente, o método apresentado pode ser utilizado para a segmentação, caracterização e classificação de trechos homogêneos, em estudos de avaliação do nível de serviço, e para a modelagem de redes de simulação microscópica de tráfego. O banco de dados montado, por sua vez, pode ser usado para auxiliar estudos a respeito do efeito de rampas críticas, pontes, túneis, postos policiais, acessos e entrelaçamentos na operação da corrente de tráfego.

Em seguida, foram tratados e analisados os dados de tráfego obtidos pelos sensores selecionados anteriormente. Ao final desse processo, dos 25 pontos de coleta usados, foi obtido um total de 788.122 observações, coletadas no período entre janeiro de 2010 e agosto de 2011, em intervalos de cinco ou seis minutos. Verificou-se que embora a distribuição das velocidades em cada intervalo não seja perfeitamente simétrica, a média é muito próxima à mediana em todos os casos, de forma que qualquer uma das variáveis pode ser usada como medida de tendência central. Além disso, conforme preconizado pelo HCM, os dados de fato mostram que há uma gama de fluxos na qual a velocidade média se mantém constante, equivalente à velocidade de fluxo livre.

Em uma primeira análise sobre os dados tratados, foi observado que a forma de classificação de rodovias de pista dupla proposta pelo HCM, entre autoestradas (*freeways*) e rodovias de pista dupla convencionais (*multilane highways*), baseada na existência de controle de acessos, faz pouco sentido para as rodovias estudadas. Alternativamente, verificou-se significativa diferença operacional entre: (1) as vias rurais, isoladas do sistema viário local e que servem ao tráfego tipicamente rodoviário; e (2) as rodovias urbanas, nas quais os acessos, controlados ou não, são mais frequentes e cujo tráfego é composto por uma significativa parcela de viagens locais. Assim, foram definidos dois grupos de rodovias para o estado de São Paulo: rurais e urbanas.

Para esses dois conjuntos, foram investigados os limites da porção curva do modelo fluxo - velocidade, que consistem na: (1) capacidade C e velocidade na capacidade CS ; e (2) ponto de transição BP , no qual a velocidade média dos automóveis passa a decrescer em função do aumento do volume de tráfego.

Verificou-se inicialmente que a capacidade pode ser influenciada pelo greide dos trechos, sendo recomendado para trabalhos futuros um estudo mais aprofundado acerca desse

fenômeno. Para os demais trechos em rodovias rurais, foram obtidos valores para a capacidade próximos aos apresentados pelo HCM. No entanto, a velocidade na capacidade CS se mostrou sistematicamente superior à constante no manual americano, de forma que CD é sempre inferior. Para as rodovias urbanas, os valores obtidos para CD foram similares aos do HCM 2010, sendo C e CS ligeiramente inferiores.

Com relação ao ponto de transição BP , para as vias rurais, como no modelo do HCM 2010 de autoestradas (*freeways*), foi identificada uma tendência de diminuição de BP com o aumento de FFS . Para vias urbanas, como no modelo do HCM para rodovias de pista dupla convencionais (*multilane highways*), essa relação não foi verificada, sendo proposto como valor representativo para BP a média das observações.

Nos dois casos, os valores encontrados foram significativamente inferiores aos apresentados pelo HCM. Essa conclusão corrobora a tendência apontada nos estudos que subsidiaram a versão atual do manual americano, que mostraram que embora a porção de velocidade constante do modelo fluxo-velocidade exista de fato, ela não se estende tanto quanto se acreditava [Roess, 2011b].

Sendo a velocidade média da corrente de tráfego no ponto de transição BP correspondente à velocidade de fluxo livre FFS , o ajuste do modelo fluxo-velocidade pôde ser realizado simultaneamente para todas as curvas, após a determinação das funções que expressam os limites para as curvas. Como resultado, foram produzidos, para as rodovias rurais e urbanas, modelos fluxo-velocidade que, quando vistos como um todo, têm “aspecto coerente”, sem a necessidade de procedimentos adicionais de ajuste visual. Foram fornecidas as equações que descrevem o modelo proposto, representado graficamente na Figura 7-1 e na Figura 7-2.

Figura 7-1: Curvas fluxo-velocidade propostas – Rodovias rurais

Figura 7-2: Curvas fluxo-velocidade propostas – Rodovias urbanas

Comparando-se as curvas propostas com as do HCM 2010, é possível notar que o modelo calibrado para rodovias urbanas guarda um aspecto semelhante ao modelo do HCM 2010

multilane highways, enquanto o modelo proposto para vias rurais possui um aspecto semelhante ao apresentado pelo HCM 2010 para *freeways*. Em ambos os casos, a principal diferença reside em valores significativamente inferiores para *BP*, o fluxo a partir do qual se nota um declínio da velocidade em função do aumento do fluxo de tráfego. Outro ponto de destaque é que, embora os valores da capacidade do modelo do HCM e do calibrado sejam parecidos entre, a velocidade na capacidade *CS* é superior nas rodovias estudadas.

As Tabela 7-1 e a Tabela 7-2 resumem a comparação entre os pontos notáveis do modelo proposto e o do usado pelo HCM 2010, para os dois grupos de rodovias.

Tabela 7-1: Comparação do modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla rurais com o modelo do HCM 2010 para *freeways*

FFS (km/h)	Ponto de transição <i>BP</i> (cp/h)		Capacidade <i>C</i> (cp/h)		Velocidade na capacidade <i>CS</i> (km/h)	
	Proposto	HCM 2010	Proposto	HCM 2010	Proposto	HCM 2010
120	600	1.000	2.550	2.400	94	86
110	700	1.200	2.450	2.350	91	84
100	800	1.400	2.350	2.300	87	82
90	900	1.600	2.250	2.250	83	80

Tabela 7-2: Comparação do modelo proposto para autoestradas e rodovias de pista dupla urbanas com o modelo do HCM 2010 para *multilane highways*

FFS (km/h)	Ponto de transição <i>BP</i> (cp/h)		Capacidade <i>C</i> (cp/h)		Velocidade na capacidade <i>CS</i> (km/h)	
	Proposto	HCM 2010	Proposto	HCM 2010	Proposto	HCM 2010
110	450	-	2.300	-	90	-
100	500	1.400	2.150	2.200	84	88
90	550	1.400	2.000	2.100	78	81
80	600	1.400	1.850	2.000	72	74

7.2 Recomendações

Este estudo se concentrou na análise de trechos de fluxo não interrompido de autoestradas e rodovias de pista dupla, mas não se dispôs de qualquer ponto de coleta com velocidade de fluxo *FFS* próxima a 90 km/h. Em vista disso, no modelo proposto para rodovias rurais, essa curva consiste em uma extrapolação das demais, enquanto que para as rodovias urbanas, a curva de 90 km/h foi interpolada. Dessa forma, é recomendada a aplicação da análise realizada neste trabalho com dados coletados em trechos com *FFS* em torno de 90 km/h.

Além disso, recomenda-se que o banco de dados usado inclua trechos de autoestradas com “condições padrão” em terreno montanhoso, que poderiam possivelmente conter pontos de coleta com velocidade de fluxo livre em torno de 90 km/h, ou ainda serem utilizados para estudar o impacto dos aclives nos pontos notáveis do modelo fluxo-velocidade, em especial a capacidade. Recomenda-se também a investigação do efeito das condições climáticas sobre o comportamento do tráfego, refletido no modelo calibrado.

É desejável também a obtenção de observações adicionais em outros trechos de autoestradas e rodovias de pista dupla de alto padrão nos quais há restrições na velocidade e/ou nos quais a influência de áreas urbanizadas é perceptível. Esses dados poderiam subsidiar investigações mais aprofundadas acerca da diferença operacional entre as rodovias rurais e urbanas.

Por fim, seria interessante aprofundar este estudo com a elaboração de um modelo da capacidade C em função da velocidade de fluxo livre (FFS) em rodovias rurais e urbanas, por meio da ampliação do número de observações em trechos de fluxo não interrompido nos quais a capacidade é atingida. Com esses dados, seria possível calibrar a relação entre a velocidade de fluxo livre FFS e os valores obtidos para C com o uso do método PLM, sendo ainda possível comparar os resultados com os valores obtidos pelo método de otimização.

REFERÊNCIAS

- ARTESP [2004] **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, São Paulo, SP.
- Avrenli, K. A.; Benekohal, R.; Ramezani, H. [2011] Determining the Speed-Flow Relationship and Capacity for a Freeway Work Zone with No Lane Closure. In: **Proceedings of the 90th Annual Meeting of the TRB**, Washington, DC (CD-ROM).
- Banks, J. H. [1989] Freeway Speed-Flow-Concentration Relationship: More Evidence and Interpretations. **Transportation Research Record**, v. 1225, p. 53-60.
- Banks, J. H. [1990] Flow Processes at Freeway Bottleneck. **Transportation Research Record**, v. 1287, p. 20-28.
- Bassan, S.; Polus, A. [2010] Meaning of Actual Capacity of Freeways and its Estimation. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 37, p. 77-87.
- Bessa Júnior, J. E. [2009] **Caracterização do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples do estado de São Paulo**. Dissertação (mestrado), EESC-USP, São Carlos, SP, 182 p.
- Brilon, W.; Geistefeldt, J.; Regler, M. [2005] Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity. In: **Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory**, College Park, Maryland, p. 125-144.
- Brilon, W.; Lohoff, J. [2011] Freeway Flow Models. In: **90th Annual Meeting of the TRB**, Washington, DC, EUA (CD-ROM).
- Brilon, W.; Poncelet, M. [1995] Application of Traffic Flow Models. In: **Proceedings on the Workshop on Traffic and Granular Flow**, World Scientific, Cingapura, p. 23-40.
- Brilon, W.; Zurlinden, H. [2003] Breakdown Probability and Traffic Efficiency as Design Criteria for Freeways. **Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik**, v. 870, Bonn, Alemanha.
- Chin, H. C.; May, A. D. [1991] Examination of the Speed-Flow Relationships at the Caldecott Tunnel. **Transportation Research Record**, v. 1320, p. 75-82.

- CNT [2011]. **Pesquisa CNT de Rodovias 2010**: Relatório Gerencial. Confederação Nacional do Transporte – CNT, SEST, SENAT, Brasília, DF, 269 p.
- Cunha, A. L. B. N. [2007] **Avaliação do Impacto da Medida de Desempenho no Equivalente Veicular de Caminhões**. Dissertação (mestrado), EESC-USP, São Carlos, SP, 150 p.
- Cunha, A. L. B. N.; Setti, J. R. [2009] Fatores de Equivalência para Caminhões em Rodovias de Pista Dupla. In: **Anais do 6º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C 2009**, Florianópolis, SC (CD-ROM), 15 p.
- Demarchi, S. H. [2000] **Influência dos Veículos Pesados na Capacidade e Nível de Serviço de Rodovias de Pista Dupla**. Tese (doutorado), EESC-USP, São Carlos, SP, 166 p.
- Demarchi, S. H.; Setti, J. R. [2000] Calibração da curva fluxo-velocidade-densidade para rodovias de pista dupla brasileiras. In: **Anais do XI Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transportes**, Gramado, RS, p. 131-144.
- DER-SP [2010] **Web Rotas**. Departamento de Estradas de Rodagem, Governo de São Paulo. Disponível em: <200.144.30.104/website/webrota/viewer.htm> Acessado em: set. 2010.
- DER-SP [2011] **Localização de Radares**. Departamento de Estradas de Rodagem, São Paulo. Disponível em: <www.der.sp.gov.br/servicos/localizacaoRadares.aspx> Acessado em: fev. 2011.
- DNIT [2006a] **Diretrizes Para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários – Escopo Básico/Instruções de Serviço**: Publicação IPR - 726. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, p. 34-34.
- DNIT [2006b] **Manual de Estudos de Tráfego**: Publicação IPR - 723. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, 384 p.
- Egami, C. Y.; Setti, J. R. [2006] Adaptação do HCM 2000 para rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil. In: **Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Brasília, DF, v. 1, p. 75-75.

- Farr, T. G. *et al.* [2007] **The Suttle Radar Topography Mission**, Ver. Geophys., 45, RG2004. Disponível em: <www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html> Acessado em: out. 2010.
- FDOT [2009] **Quality/Level of Service Handbook**. Systems Planning Office. Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, EUA, 152 p.
- FGSV [2005] **Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS 2001**. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Colonia, Alemanha.
- Geistefeldt, J. [2008] Empirical Relation Between Stochastic Capacities and Capacities Obtained from the Speed-flow Diagram. In: **Proceedings of the Symposium on the Fundamental Diagram: 75 years**. Woods Hole, MA, EUA, p. 1-12.
- Gerlough, D. L.; Huber, M. J. [1975] **Traffic Flow Theory - A Monograph**. Special Report 165, Transportation Research Board, Washington, D.C, EUA.
- GOOGLE [2011] **Google Earth**. Disponível em: <<http://www.google.com/earth/index.html>> Acessado em: fev. 2011.
- Greenshields, B. D. [1935] A Study of Traffic Capacity. **Proceedings of the HRB**, v. 14, p. 448-477. Highway Research Board, Washington, D. C., EUA.
- Haddad, E. A. [2006] Transporte, eficiência e desigualdade regional: avaliação com um modelo CGE para o Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 36, n. 3, p. 413-448.
- Hall, F. L. [1992] **Traffic Stream Characteristics**. McMaster University, Department of Civil Engineering and Department of Geography, Hamilton, Ontario, Canadá.
- Hall, F. L.; Agyemang-Duah, K. [1991] Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity. **Transportation Research Record**, v. 1320, p. 91-98.
- Hall, F. L.; Hall, L. M. [1990] Capacity and Speed-Flow Analysis of Queen Elizabeth Way in Ontario. **Transportation Research Record**, v. 1287, p. 20-28.

- Hall, F. L.; Persaud, B. N. [1989] Evaluation of Speed Estimates Made with Single-Detector Data from Freeway Traffic Management Systems. **Transportation Research Record**, v. 1232, p. 9-16.
- HRB [1965] **Highway Capacity Manual**. Highway Research Board, Washington, D.C., EUA.
- Hurdle, V. F.; Datta, P. L. [1983] Speeds and Flows on an Urban Freeway: Some Measurements and a Hypothesis. **Transportation Research Record**, v. 905, p. 127-137.
- Kaplan, E. L.; Meier, P. [1958] Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. **Journal of the American Statistical Association**, v. 53, p. 457-481.
- Kennedy, N., Kell, J. H.; Homburger, W. [1973] **Fundamentals of Traffic Engineering**, 8th ed., Institute of Transportation and Traffic Engineering, Berkeley, CA, EUA.
- Lighthill, M. J.; Whitham, G. B. [1955] On Kinematic Waves. In: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. **Proceedings of the Royal Society A229** n. 1178, p. 317-145.
- Lorenz, M.; Elefteriadou, L. [2001] A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown. In: **Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, TRB-Circular E-C018**, TRB, Washington, D.C., EUA, p. 84-95.
- Persaud, B. N.; Hurdle, V. F. [1988] Some New Data that Challenge Some Old Ideas About Speed-Flow Relationships. **Transportation Research Record**, v. 1194, p. 191-198.
- Rakha, H.; Arafeh, M. [2010] Calibrating Steady-State Traffic Stream and Car-Following Models Using Loop Detector Data. **Transportation Science**, v. 44, n. 2, p. 151-168.
- Rakha, H.; Crowther, B. [2002] A Comparison of the Greenshields, Pipes, and Van Aerde Car-Following and Traffic Stream Models. **Transportation Research Record**, v. 1802, p. 248-262.
- Riente, G.; Rodrigues-Silva, K. C.; Gouvêa, R. G. [2008a] Aplicabilidade das Metodologias Rodoviárias do Highway Capacity Manual 2000 no Brasil. In: **Anais do XXII**

Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Fortaleza, CE (CD-ROM), 8 p.

Riente, G.; Rodrigues-Silva, K. C.; Gouvêa, R. G. [2008b] Considerações Sobre a Determinação de Fatores de Equivalência de Veículos Pesados em Rodovias de Pistas Simples. In: **Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Fortaleza, CE (CD-ROM), 8 p.

Riente, G.; Rodrigues-Silva, K. C.; Puty Filho, S. A. [2011] Panorama Normativo e Tecnológico da Avaliação Operacional das Concessões Rodoviárias. In: **Anais do 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C 2011**, Foz do Iguaçu, PR (CD-ROM), 14 p.

Riente, G.; Setti, J. R. [2011] Método para Caracterização e Classificação de Trechos Homogêneos Rodoviários. In: **Anais do 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C 2011**, Foz do Iguaçu, PR (CD-ROM), 14 p.

Roess, R. P. [2009a] **Freeway Speed-Flow Curves**. Research Memorandum. Polytechnic Institute of New York University, Brooklyn, N. Y, EUA, 31 p.

Roess, R. P. [2009b] **Re-Calibration of the 75-mi/h Speed-Flow Curve and the FFS Prediction Algorithm for HCM 2010**. Research Memorandum, NCHRP Project 3-92. Polytechnic Institute of New York University, Brooklyn, N. Y, EUA, 16 p.

Roess, R. P. [2011a] Speed-Flow Curves for Freeways in the HCM: A Historical Perspective. In: **90th Annual Meeting of the TRB**, Washington, DC, EUA (CD-ROM).

Roess, R. P. [2011b] Speed-Flow Curves for Freeways in the 2010 HCM. **90th Annual Meeting of the TRB**, Washington, DC, EUA (CD-ROM).

Roess *et al.* [2008] **Analysis of Freeway Weaving Sections**. Final Report, NCHRP Project 3-75. Polytechnic Institute of New York University e Kittelson & Associates Inc., Brooklyn, N. Y, EUA, 158 p.

Roess, R.; Ulerio, J. [1993]. **Capacity of Ramp-Freeway Junctions**. Final Report, NCHRP Project 3-37. Polytechnic University, Brooklyn, N.Y, EUA.

Roess, R. P.; Prassas, E. S.; McShane, W. R. [2010] **Traffic Engineering**. 4th ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, EUA.

Sachse, T. [1993] **The Influence of the Time Interval on the Determination of Capacity**. PTRC Education and Research Services Ltd., University of Manchester. Manchester, UK, p. 139-150.

Schneider, A. [2010] **GPS Visualizer**. Disponível em: <www.gpsvisualizer.com> Acessado em: nov. 2010.

Schoen, J.; May, A.; Reilly, W.; Urbanik, T. [1995] **Speed-Flow Relationships for Basic Freeway Segments, Final Report**, NCHRP Project 3-45, JHK & Associates, Tucson, AZ, EUA.

Setti, J. R. [2009] Highway Capacity Manual ou Manual de Capacidade Viária? In: **Anais do 6º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C 2009**, Florianópolis, SC (CD-ROM), 11 p.

Sun, L.; Yang, J.; Mahmassani, H.; Gu, W.; Kim, B. J. [2010] Data Mining-Based Adaptive Regression for Developing Equilibrium Speed-Density Relationships. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 37, p. 389-400.

Sun, L. Zhou, J. [2005] Development of Multiregime Speed-Density Relationships by Cluster Analysis. **Transportation Research Record**, v. 1934, p. 64-71.

TCU. [2008] **Acórdão 2104/2008 Plenário, processo nº 016.189/2008-9**. Tribunal de Contas de União. Entidade: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Ministro relator: Ubiratan Aguiar. Disponível em: <portal2.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/detalhes_noticias?noticia=777746> Acessado em: 7/7/2009.

TRB [1985] **Highway Capacity Manual**. Special Report 209. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA.

TRB [1994] **Highway Capacity Manual**: Special Report 209. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA.

TRB [2000] **Highway Capacity Manual 2000**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA.

- TRB [2010] **Highway Capacity Manual 2010**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA.
- Urbanik II, T.; Hinshaw, W.; Barnes, K. [1991] Evaluation of High-Volume Urban Texas Freeways. **Transportation Research Record**, v. 1320, p. 91-98.
- Van Aerde, M.; Rakha, H. [1995] Single Regime Speed-Flow Density Relationship for Congested and Uncongested Highways. In: **74th Annual Meeting of the TRB**, Paper 950802, Washington, D.C., EUA.
- Wardrop, J. G. [1952] Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Part II, v. I, p. 325-362.
- Washburn, S. S.; Yin, Y.; Modi, V.; Kulshrestha, A. [2010] **Investigation of Freeway Capacity, Part B: Freeway Capacity Estimation for Florida Freeways, Final Report**. Transportation Research Center, University of Florida, Tallahassee, FL, EUA, 119 p.
- Watanatada, T.; Dhareshwar, A.; Rezende-Lima, P. R. S. [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, 460 p.
- Zhao, N.; Yu, L.; Zhao, H.; Guo, J.; Wen, H. [2009] Analysis of Traffic Flow Characteristics on Ring Road Expressways in Beijing. **Transportation Research Record**, v. 2124, p. 178-185.

APÊNDICE A

Neste apêndice, são mostrados os resultados obtidos para todas os trechos para os quais foi possível discernir ao menos parte do formato da porção curva da relação fluxo-velocidade, com exceção daquelas já apresentadas no Capítulo 6. Cada gráfico representa as observações obtidas para o sensor, as médias das velocidades a intervalos de 50 cp/(h.faixa), as curvas fluxo-velocidade calibradas e o modelo do HCM 2010, conforme o caso. Mesmo para os locais nos quais a capacidade não é atingida, são apresentadas as curvas fluxo-velocidade completas, até a capacidade que seria esperada para aquele trecho. Ainda que não seja possível garantir que tais fluxos máximos seriam efetivamente atingidos, o modelo completo, calibrado a partir de toda amostra estudada, indica as condições esperadas para fluxos superiores aos observados durante o período monitorado.

Alguns locais aparentam atingir a capacidade abaixo dos valores estabelecidos no Capítulo 5: km 37 leste e km 51,9 leste da SP-280 (Figura A-14 e Figura A-15, respectivamente). Tratam-se de pontos de coleta situados em aclives, para os quais se decidiu desconsiderar os valores obtidos para a capacidade C e para a densidade na capacidade CD , mas que foram mantidos para o propósito de se investigar o ponto de transição BP e a forma da porção convexa do modelo fluxo-velocidade.

Em outros casos, a capacidade aparenta estar subestimada: km 18,3 norte da SP-021 e km 27 leste da SP-280 (Figura A-10 e Figura A-13, respectivamente). Embora valores mais altos de fluxo tenham sido observados para esses trechos, tal fenômeno não se repetiu de maneira sistemática em todos os locais estudados, de modo que o modelo calibrado simultaneamente para toda a amostra pode ter produzido valores menores do que os possíveis para esses locais, mas adequados para representar a condição média da operação em autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas.

Figura A-1: SP-348, km 47 norte

Figura A-2: SP-348, km 50 norte

Figura A-3: SP-348, km 50 sul

Figura A-4: SP-348, km 59 norte

Figura A-5: SP-348, km 65 norte

Figura A-6: SP-348, km 65 sul

Figura A-7: SP-348, km 87 norte

Figura A-8: SP-348, km 87 sul

Figura A-9: SP-348, km 131,7 norte

Figura A-10: SP-021, km 18,3 norte

Figura A-11: SP-021, km 22,3 norte

Figura A-12: SP-280, km 16 oeste

Figura A-13: SP-280, km 27 leste

Figura A-14: SP-280, km 37 leste

Figura A-15: SP-280, km 51,9 leste

Figura A-16: SP-280, km 59,6 leste

Figura A-17: SP-280, km 75,9 oeste

Figura A-18: SP-280, km 18,4 marginal leste

Figura A-19: SP-270, km 39,9 leste

APÊNDICE B

De forma a caracterizar e seleccionar os trechos adequados à coleta dos dados de tráfego que subsidiaram este estudo, foi desenvolvido um aplicativo computacional (*Geographic Analysis Tool*) para a montagem e tratamento de uma base de dados obtidos de múltiplas fontes, que implementa o método descrito no Capítulo 3. A Figura B-1 mostra a interface principal com o usuário, na qual constam os botões que acionam os principais algoritmos da ferramenta (barra de tarefas na parte superior da tela) e os parâmetros de calibração, ajustáveis pelo analista.

Figura B-1: Interface principal do aplicativo desenvolvido para o tratamento de trechos

Dentre as principais funcionalidades implementadas pela ferramenta, incluem-se:

- Importação automática de trilhas (*tracks*) e pontos (*waypoints*) gravadas com o uso de um GPS (botões na extrema esquerda da barra de tarefas);
- Caracterização da geometria de uma rodovia, tanto em termos de parâmetros gerais (*Rise & Fall* e Curvatura), quanto rampas específicas (botões “*Find Waypoints*” e “*Grade Breaker*”), segundo critérios configuráveis pelo usuário (caixa na parte inferior direita da tela – “*Profile Tool*”);
- Exportação para o Google Earth (ferramenta “*Export to Google Earth*”) de: (1) marcos quilométricos, na escala especificada pelo usuário; (2) *Waypoints* gravados com um

GPS; e (3) pontos de interesse (POIs) para os quais não se conhece a coordenada, mas sim o marco quilométrico.

A Figura B-2 e a Figura B-3 mostram exemplos de dados de entrada usados pelo aplicativo. A primeira tela se refere às trilhas importadas automaticamente pela ferramenta, sendo que cada registro (linha) corresponde a um registro armazenado a intervalos de um segundo. A segunda imagem consiste na lista de pontos de interesse. Neste caso, cada registro deve ser informado pelo usuário, sendo obrigatório a especificação do marco quilométrico no qual cada elemento se situa (primeira coluna).

GPS Recorded Tracks

ZONA	LESTE	NORTE	ALTITUDE	DATA	km	AZIMUTE	VEL	ESTRADA	Num	Time (s)	Gap test (km)
	-22,4785	-47,3990	690,6	23/set/2010 16:41:13	0,02	181,4680233	72,68km/h	SP 330	1	1,0	0
	-22,4787	-47,3990	688,9	23/set/2010 16:41:12	0,02	180,9759236	72,69km/h	SP 330	2	1,0	0,0
	-22,4788	-47,3990	687,2	23/set/2010 16:41:11	0,02	180,4897585	72,64km/h	SP 330	3	1,0	0,0
	-22,4790	-47,3990	685,5	23/set/2010 16:41:10	0,02	180,4850031	73,35km/h	SP 330	4	1,0	0,0
	-22,4792	-47,3990	683,9	23/set/2010 16:41:09	0,02	180,484976	73,32km/h	SP 330	5	1,0	0,0
	-22,4794	-47,3990	682,8	23/set/2010 16:41:08	0,02	180	71,87km/h	SP 330	6	1,0	0,0
	-22,4796	-47,3990	681,7	23/set/2010 16:41:07	0,02	180,4939728	71,87km/h	SP 330	7	1,0	0,0
	-22,4798	-47,3990	680,7	23/set/2010 16:41:06	0,02	180,4986255	71,19km/h	SP 330	8	1,0	0,0
	-22,4799	-47,3990	679,6	23/set/2010 16:41:05	0,02	180,4985969	71,21km/h	SP 330	9	1,0	0,0
	-22,4801	-47,3990	678,7	23/set/2010 16:41:04	0,02	180,9878683	71,85km/h	SP 330	10	1,0	0,0
	-22,4803	-47,3990	678	23/set/2010 16:41:03	0,02	180,9941866	71,15km/h	SP 330	11	1,0	0,0
	-22,4805	-47,3990	677,3	23/set/2010 16:41:02	0,02	180,9878657	71,82km/h	SP 330	12	1,0	0,0
	-22,4806	-47,3990	676,7	23/set/2010 16:41:01	0,02	180,4985943	71,13km/h	SP 330	13	1,0	0,0
	-22,4808	-47,3990	676	23/set/2010 16:41:00	0,02	180,4939957	71,80km/h	SP 330	14	1,0	0,0
	-22,4810	-47,3990	676,2	23/set/2010 16:40:59	0,02	180,4939676	71,77km/h	SP 330	15	1,0	0,0
	-22,4812	-47,3990	676,4	23/set/2010 16:40:58	0,02	180,9878605	71,78km/h	SP 330	16	1,0	0,0
	-22,4814	-47,3990	676,5	23/set/2010 16:40:57	0,02	180,4910358	71,76km/h	SP 330	17	1,0	0,0
	-22,4815	-47,3990	676,7	23/set/2010 16:40:56	0,02	180,4939657	71,77km/h	SP 330	18	1,0	0,0
	-22,4817	-47,3990	677,3	23/set/2010 16:40:55	0,02	180,4939924	71,79km/h	SP 330	19	1,0	0,0
	-22,4819	-47,3990	678,8	23/set/2010 16:40:54	0,02	180,9878553	71,97km/h	SP 330	20	1,0	0,0
	-22,4821	-47,3990	680,2	23/set/2010 16:40:53	0,02	180,987854	71,95km/h	SP 330	21	1,0	0,0
	-22,4823	-47,3990	681,7	23/set/2010 16:40:52	0,02	180,4989521	71,25km/h	SP 330	22	1,0	0,0
	-22,4824	-47,3990	683,1	23/set/2010 16:40:51	0,02	180,4939624	71,94km/h	SP 330	23	1,0	0,0
	-22,4826	-47,3990	684,3	23/set/2010 16:40:50	0,02	180,4910041	71,89km/h	SP 330	24	1,0	0,0

Figura B-2: Dados de entrada: trilhas gravadas com o auxílio de GPS

Points of Interest

km	Segment	Segment MACRO	Description	Latitude	Longitude
13,85	SP 330	SP 330	Radar Norte		
54,59	SP 330	SP 330	Radar		
60,57	SP 330	SP 330	Radar Norte		
109,56	SP 330	SP 330	Radar Norte		
111,054	SP 330	SP 330	Radar Sul		
121,98	SP 330	SP 330	Radar Norte		
128,42	SP 330	SP 330	Radar Norte		
158,45	SP 330	SP 330	Radar Sul		
28	SP 348	SP 348	Radar Sul		
42	SP 348	SP 348	Radar Sul		
45	SP 348	SP 348	Radar Sul		
44,45	SP 348	SP 348	Radar Norte		
61,85	SP 348	SP 348	Radar Norte		
63,18	SP 348	SP 348	Radar Sul		
111,562	SP 348	SP 348	Radar Norte		
131,692	SP 348	SP 348	Radar Sul		
34	SP 280	SP 280	Radar Leste		
40,33	SP 280	SP 280	Radar Oeste		
52,06	SP 280	SP 280	Radar Oeste		
59	SP 280	SP 280	Radar Oeste		
63,02	SP 280	SP 280	Radar Leste		
71,38	SP 280	SP 280	Radar Oeste		
95,02	SP 270	SP 270	Radar		
109,93	SP 270	SP 270	Radar Leste		

Figura B-3: Dados de entrada: pontos de interesse informados pela ARTESP e DER-SP

A Figura B-4 e a Figura B-5, por sua vez, representam duas telas do aplicativo nas quais são gerados os relatórios apresentados neste trabalho. A primeira imagem mostra o relatório que apresenta os perfis verticais dos trechos armazenados no banco de dados, incluindo o perfil bruto, suavizado e as rampas médias. Na barra de tarefas, é possível alterar algumas configurações, tais como a extensão do segmento a ser representado, o tipo de método de suavização a ser aplicado e o número de pontos considerados pela média móvel.

A segunda imagem consiste na ferramenta capaz de gerar croquis esquemáticos de qualquer trecho armazenado no banco de dados, em função das informações disponíveis, tais como o número de faixas, a ocupação lindeira, os acessos ou a presença de dispositivos de fiscalização eletrônica ou sensores de tráfego. Na barra de tarefas, é possível alterar algumas especificações, tais como a extensão representada, o sentido e a escala.

Figura B-4: Relatório gerado: perfil vertical da rodovia analisada

Figura B-5: Relatório gerado: croqui esquemático da rodovia analisada