ANDRÉ LUIZ BARBOSA NUNES DA CUNHA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MEDIDA DE DESEMPENHO NO EQUIVALENTE VEICULAR DE CAMINHÕES

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 Engenharia Civil. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Reynaldo Anselmo Setti

São Carlos
2007

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

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

C972a

Cunha, André Luiz Barbosa Nunes da
Avaliação do impacto da medida de desempenho no
Equivalente veicular de caminhões / André Luiz Barbosa
Nunes da Cunha ; orientador José Reynaldo Anselmo Setti.
-- São Carlos, 2007.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Área de concentração em
Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) -
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2007.

1. Equivalente veicular. 2. Caminhões. 3. Tráfego
rodoviário - simulação. 4. Calibração. 5. Algoritmos
genéticos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDRE LUIZ BARBOSA NUNES DA CUNHA**

Dissertação defendida e julgada em 11/10/2007 perante a Comissão Julgadora:

APPROVADO

Prof. Associado **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APPROVADO

Dr. **SERGIO HENRIQUE DEMARCHI**
(LOGIT Engenharia Consultiva Ltda.)

APPROVADO

Prof. Titular **ANTÔNIO CLÓVIS PINTO FERRAZ**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Titular **ELJI KAWAMOTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
em Engenharia de Transportes

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus pais,
José Carlos e Miriam,
e aos meus avós.

“Como educador, prefiro formar um grande homem
a um atleta de destaque.”

“Nós somos como diamantes, para se obter a melhor
forma devemos lapidá-lo ainda no começo, no seu
estágio mais bruto.”

Durval e Stopa, amigos e ex-técnicos de natação

“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter
dedicação total, buscar seu último limite e dar o
melhor de si mesmo.”

Ayrton Senna

“O que mais vale num trabalho é a dedicação do
trabalhador.”

Zaratustra

“A vontade de se preparar tem que ser maior do que
a vontade de vencer. Vencer será consequência da
boa preparação.”

Bernardinho

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, José Carlos e Miriam, e aos meus irmãos, Zé Carlos e João Paulo, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando em todas as ocasiões. Aos meus avós, Octávio Moreira e Izabel Gouveia, Gerson Nunes da Cunha (*in memoriam*) e Laura Gonçalves Nunes, pelo carinho e educação. A toda minha família, em especial aos meus padrinhos, Gerson e Laude, e minhas primas, Cláudia e Kátia, por acreditarem no meu esforço e me confortarem com palavras de incentivo todas as vezes que voltava a Campo Grande-MS.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

Ao professor Dr. José Reynaldo A. Setti, pela orientação na realização deste trabalho e pela amizade. Seus ensinamentos foram fundamentais para que as idéias fossem, pouco a pouco, dando forma a este trabalho.

Aos professores da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), professor Wagner Augusto Andreasi, principal incentivador para início do mestrado, e professor Jorge Gonda, pelo auxílio em São Carlos-SP.

Aos professores Dr. Carlos Felipe Grangeiro e Dr. Sérgio Henrique Demarchi pelas sugestões dadas à pesquisa. Ao professor Dr. Ricardo Melo pela amizade, sugestões e pelo fornecimento dos dados necessários a esta pesquisa.

À concessionária Centrovias pelos dados fornecidos para esta pesquisa e o auxílio durante a realização das coletas em campo, especialmente ao engenheiro Giovane Zito. Ao engenheiro Fábio Abrita da concessionária AutoBAn por autorizar as coletas de dados em campo.

Aos professores e funcionários do Departamento de Transportes (STT) da EESC-USP pelo apoio, convívio e amizade, em especial à Magaly. Ao professor Dr. João Alexandre Widmer pelas sugestões, ao professor Dr. Irineu da Silva e ao Paulo Sérgio Batista pela ajuda com o aparelho GPS.

Agradecimento à família Duarte, em especial à professora Dra. Ruth de Gouvêa Duarte e ao professor Dr. Luiz Romariz Duarte (*in memoriam*), por terem me acolhido em um momento

muito especial; por tudo o que fizeram por mim são considerados como meus avós.

Aos amigos do grupo de pesquisa, Cíntia Egami, Márcia Lika, Juliana Araújo, Diogo Colella e Flávio Satoshi, pela amizade e ótima convivência. As constantes ajudas, críticas e sugestões foram essenciais para o término deste trabalho.

Aos amigos do STT, Mateus, Bruno, Marcão, Wesley, Jesner, Toyama, Gigante, e Toco, fonte inesgotável de animação para todas as horas de trabalho, até por quê: “companheiro é companheiro!”. Às meninas do STT: Cira, Karênina, Fabíola, Vanessa e a “sobrinha” Kaori. Em especial ao quarteto Andréa Julia (Tatinha), Camilla Carrara, Celane Nery e Vivianne Hermógenes pelo convívio e amizade inseparável.

Agradecimento especial à Dra. Ana Paula Larocca pelo apoio inesgotável desde meu primeiro momento em São Carlos, sempre me incentivando a manter meu *hobby*: natação! Com este apoio, fiz inúmeras amizades no São Carlos Clube e agradeço a eles também, pois convivem comigo diariamente nos incansáveis treinamentos: Mauro Facci, Ricardo Colombo, Aléssio Matiello, Tiago Moda, Maurício Ninomia, Vivian Torresan, Laura Vetter, Ana, Maurício, Fabíola, Victória, Fernanda, Flávia Saia e à família Jacques; os salva-vidas Oziel, Denis, George (*in memoriam*), Tiago, Ronaldo e Jeferson; e os funcionários Júlio, Jéferson, Rosana, Rosângela e Mara.

Aos amigos de Campo Grande-MS, em especial ao Durval Barbosa e Luiz Stopa educadores importantes na minha vida. À Patrícia Pereira de Almeida pelo apoio e incentivo. Ao Eimair Bottega Ebeling pela convivência durante o período do mestrado, considerado como um irmão e ao Daniel Anijar pela convivência harmoniosa.

Aos grandes amigos de São Carlos, Rafael Ferreira e César Denari, pela união e espírito de equipe. À Ana Elisa Serafim Jorge pelo apoio na reta final deste trabalho.

RESUMO

CUNHA, A. L. B. N. **Avaliação do impacto da medida de desempenho no equivalente veicular de caminhões**. 2007. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Esta pesquisa avaliou o efeito do uso de uma medida de desempenho alternativa à densidade no cálculo dos fatores de equivalência para caminhões típicos em rodovias de pista dupla do estado de São Paulo. A medida de desempenho investigada foi a velocidade dos automóveis e os fatores de equivalência foram calculados pelo método do equivalente médio, que considera mais de um tipo de caminhão na corrente de tráfego, representa melhor a interação entre caminhões e permite o uso de simulação de tráfego para determinação dos equivalentes. Como este método de cálculo considera uma composição fixa de caminhões, o tráfego de caminhões em rodovias paulistas de pista dupla foi caracterizado em função de dois aspectos: (1) o fluxo veicular em dias úteis típicos e (2) o desempenho das configurações de caminhões, a partir da relação massa/potência. O modelo de simulação utilizado nesta pesquisa foi o CORSIM, o mesmo modelo usado no HCM-2000. Para tanto, o CORSIM foi calibrado para as condições observadas em rodovias paulistas de pista dupla. A calibração foi realizada em duas etapas, ambas baseadas em algoritmos genéticos: a primeira etapa focou no modelo de locomoção dos caminhões, resultando erros médios da ordem de 5%; a segunda visou à lógica de *car-following*, que define o comportamento dos motoristas. A versão calibrada do CORSIM para as condições paulistas apresentou erros médios de 6,32% na calibração e de 6,58% na validação. Os equivalentes veiculares foram calculados para diferentes magnitudes de greides, comprimentos de rampas, porcentagens de caminhões, velocidade de fluxo livre e níveis de serviço, tanto para a velocidade dos automóveis como para a densidade. Como resultado final, observou-se que o uso da velocidade dos automóveis como medida de desempenho implica em equivalentes veiculares muito elevados. Desta forma, a capacidade de tráfego e o nível de serviço estimado utilizando estes equivalentes foram piores do que utilizando os equivalentes veiculares obtidos com a densidade como medida de desempenho.

Palavras-chave: equivalente veicular; caminhões; simulação de tráfego; calibração; algoritmo genético.

ABSTRACT

CUNHA, A. L. B. N. **Evaluation the use of measure of impedance in the passenger-car equivalents for tucks.** 2007. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

The objective of this research was to evaluate the use of a measure of impedance alternative to density to obtain passenger-car equivalence factors for typical trucks on multilane highways in the state of São Paulo. The impedance investigated was the passenger-car speed, and the equivalence factors were obtained through the average equivalent method since it considers different types of trucks within the traffic flow, is capable to represent interactions among trucks adequately, and allow the use of traffic simulation. Since the estimation method employed is based on a fixed truck population, the truck flow on multilane highways in the state of São Paulo was characterized based on two aspects: (1) a typical traffic flow, considering the traffic flow on typical weekdays, (2) the truck performance based on mass/power ratio. The simulation model employed was CORSIM, the same model used in the HCM-2000, and it was calibrated for the conditions observed in multilane highways in the state of São Paulo. The calibration was carried out using genetic algorithms and involved two steps. The first one focused on the truck motion model and produced average errors around 5%. The second one focused on the car-following logic that defines the drivers' behavior. The CORSIM calibrated for the state of São Paulo highways produced average errors of 6.32% at the calibration stage and average errors of 6.58% at the validation stage. Passenger-car equivalents were calculated for different grade levels, grade lengths, trucks percentages, free-flow speeds and leves of service using passenger-car speed and density as the impedance measure. It was observed that, when compared to density, the use of passenger-car speed as a measure of impedance results in higher values for the equivalence factors. It means smaller capacities and worse estimates for level of service.

Keywords: passenger-car equivalent; trucks; traffic simulation; calibration; genetic algorithm.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. CONTEXTO DA PESQUISA.....	13
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	13
2. MÉTODO DE PESQUISA	15
2.1. REVISAR A BIBLIOGRAFIA	16
2.2. DEFINIR O MÉTODO DE CÁLCULO DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA E A MEDIDA DE DESEMPENHO ALTERNATIVA	16
2.3. CARACTERIZAR O FLUXO DE TRÁFEGO DE CAMINHÕES EM RODOVIAS PAULISTAS DE PISTA DUPLA E EM AUTO-ESTRADAS	16
2.4. CARACTERIZAR O DESEMPENHO DOS CAMINHÕES EM RODOVIAS PAULISTAS DE PISTA DUPLA E AUTO-ESTRADAS	17
2.5. CALIBRAR OS PARÂMETROS DO MODELO CORSIM	17
2.6. CALCULAR OS FATORES DE EQUIVALÊNCIA.....	18
2.7. COMPARAR E ANALISAR OS RESULTADOS	18
3. EQUIVALENTE VEICULAR PARA CAMINHÕES.....	21
3.1. NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA DUPLA E AUTO-ESTRADAS	21
3.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DO FATOR DE EQUIVALÊNCIA.....	24
3.2.1. Métodos baseados em modelos analíticos	25
3.2.1.1. <i>Equivalente veicular baseado no atraso relativo</i>	25
3.2.1.2. <i>Métodos de regressão</i>	27
3.2.1.3. <i>Método de Huber</i>	28
3.2.2. Métodos baseados em modelos de simulação.....	33
3.2.2.1. <i>Equivalente veicular baseado na relação q/C</i>	33
3.2.2.2. <i>Equivalente veicular baseado na capacidade básica da via</i>	35
3.2.2.3. <i>Método para mais de um tipo de caminhão na corrente de tráfego</i>	36
3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
3.3.1. Variável escolhida para o critério de equivalência	39
3.3.2. Método de cálculo do equivalente veicular	40
4. MODELO DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO.....	41
4.1. O CORSIM.....	41
4.1.1. Lógica de geração dos veículos	44
4.1.2. Lógica de locomoção veicular	45
4.1.2.1. <i>Lógica de car-following</i>	46
4.1.2.2. <i>Lógica de mudança de faixa</i>	48
4.1.2.3. <i>Lógica de desempenho veicular</i>	49
4.2. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DO CORSIM	50
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52

5. CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS PESADOS EM RODOVIAS PAULISTAS DE PISTA DUPLA	53
5.1. COLETA DE DADOS	54
5.2. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO TRÁFEGO VEICULAR.....	55
5.2.1. Determinação do fluxo de tráfego em um dia útil típico.....	58
5.2.1.1. <i>Critérios para definir o dia útil típico</i>	<i>59</i>
5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6. CARACTERIZAÇÃO DA FROTA DE CAMINHÕES EM RODOVIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	65
6.1. DESEMPENHO DOS CAMINHÕES	65
6.1.1. Coleta de dados	66
6.1.1.1. <i>Nomenclatura dos caminhões</i>	<i>67</i>
6.1.2. Caminhões típicos em rodovias paulistas de pista dupla	68
6.1.2.1. <i>Análise da relação massa/potência em rodovias de pista dupla</i>	<i>70</i>
6.1.3. Caminhões típicos em rodovias de pista simples	71
6.1.3.1. <i>Comparação entre caminhões típicos em rodovias de pista dupla e de pista simples</i>	<i>73</i>
6.2. CATEGORIAS TÍPICAS.....	74
6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
7. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CORSIM	77
7.1. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DOS CAMINHÕES.....	77
7.1.1. Curvas de desempenho veicular	78
7.1.1.1. <i>Coleta de dados.....</i>	<i>80</i>
7.1.2. Algoritmo Genético.....	82
7.1.2.1. <i>Criação dos indivíduos da população</i>	<i>85</i>
7.1.2.2. <i>Criação dos arquivos de simulação.....</i>	<i>85</i>
7.1.2.3. <i>Simulação.....</i>	<i>86</i>
7.1.2.4. <i>Obtenção do perfil de velocidade simulado.....</i>	<i>86</i>
7.1.2.5. <i>Comparação entre os perfis de velocidade simulado e observado.....</i>	<i>86</i>
7.1.2.6. <i>Cálculo do erro médio absoluto (EMA).....</i>	<i>87</i>
7.1.2.7. <i>Critérios de parada.....</i>	<i>87</i>
7.1.3. Resultados obtidos.....	87
7.2. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MOTORISTAS	90
7.2.1. Validação do CORSIM	92
7.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
8. CÁLCULO DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA	93
8.1. CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES	93
8.1.1. Variabilidade nas simulações	94
8.1.2. Cenários simulados	95
8.1.2.1. <i>Características do tráfego</i>	<i>95</i>
8.1.2.2. <i>Geometria do trecho</i>	<i>97</i>
8.1.2.3. <i>Tempo de simulação.....</i>	<i>97</i>
8.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	98

8.2.1.	Cálculo das variáveis de tráfego	98
8.2.2.	Geração das curvas fluxo-impedância	99
8.3.	DETERMINAÇÃO DO EQUIVALENTE VEICULAR	101
8.3.1.	Definição dos limites dos níveis de serviço	102
8.3.2.	Equivalentes veiculares baseados na velocidade média dos automóveis	105
8.3.3.	Equivalentes veiculares baseados na densidade	111
8.4.	ANÁLISE PRÁTICA DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA	115
8.4.1.	Análise comparativa entre as medidas de impedância.....	115
8.4.2.	Análise comparativa com outros estudos.....	120
8.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
9.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	125
9.1.	CONCLUSÕES	125
9.2.	RECOMENDAÇÕES.....	127
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
	APÊNDICE A. VOLUME DE TRÁFEGO NO DIA TÍPICO	137
A.1.	RODOVIA WASHINGTON LUIZ (SP-310).....	137
A.2.	VIA ANHANGÜERA (SP-330).....	138
A.3.	RODOVIA DOS BANDEIRANTES (SP-348).....	141
	APÊNDICE B. O ARQUIVO TSD DO CORSIM.....	143
B.1.	ESTRUTURA DO ARQUIVO TSD.....	143
B.2.	PROGRAMA PARA EXTRAIR OS DADOS DO ARQUIVO TSD	145
B.2.1.	Código do programa	145

1. INTRODUÇÃO

As análises de capacidade e nível de serviço em rodovias são aspectos avaliados pelos engenheiros de tráfego durante o processo de planejamento, projeto e operação do sistema de transportes. A análise da capacidade permite estimar a taxa máxima de fluxo que uma determinada seção da rodovia pode acomodar em condições específicas de tráfego e das características da via. O nível de serviço é uma medida qualitativa que descreve as condições operacionais da corrente de tráfego, baseado em medidas de desempenho como velocidade e tempo de viagem, liberdade de manobra, interrupções de tráfego, conforto e conveniência [TRB, 2000]. De modo geral, quanto menor o fluxo de veículos, melhor a qualidade de operação; por outro lado, quanto mais o fluxo se aproxima da capacidade, pior o nível de serviço e, conseqüentemente, maior probabilidade de ocorrer congestionamentos.

No Brasil, as concessionárias de rodovias do estado de São Paulo utilizam o nível de serviço para garantir a qualidade do serviço prestada aos usuários. Sob a supervisão da Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), as concessionárias fornecem revisões anuais do desempenho operacional nas rodovias. De acordo com uma das cláusulas do contrato de concessão, essas empresas devem “impedir que qualquer trecho da via [...] venha a superar o nível de serviço D em mais de 50 horas/ano, em acordo com os critérios estabelecidos pelo *Highway Capacity Manual* (HCM)”, durante todo o período de concessão [DER-SP, 1997]. Caso o nível D supere o limite de 50 horas/ano, a concessionária deve aumentar a capacidade de tráfego investindo na infra-estrutura rodoviária.

A falta de um manual de capacidade rodoviária próprio para as condições brasileiras remete à utilização direta do HCM. Recentemente, o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes apresentou o Manual de Estudos de Tráfego [DNIT, 2006] cujos

procedimentos e valores dos fatores de ajustes, para a análise de capacidade e nível de serviço em rodovias, são os mesmos apresentados no HCM-2000. Entretanto, o próprio HCM ressalta que os procedimentos apresentados para rodovias americanas devem ser adaptados às condições locais de cada região. O desempenho dos caminhões, a composição típica da frota de caminhões no tráfego, o comportamento dos motoristas, o conceito de congestionamento e, principalmente, a tolerância ao congestionamento são algumas características do tráfego que podem diferir de maneira expressiva entre Brasil e EUA.

Demarchi [2000] e Egami [2006] demonstraram as distorções causadas pelo uso direto do HCM para estimar o nível de serviço em rodovias brasileiras de pista dupla e de pista simples, respectivamente. Para as rodovias de pista dupla do estado de São Paulo, Demarchi recalculou os valores de equivalentes veiculares para caminhões com base na densidade da corrente de tráfego, mesma medida utilizada no HCM. Os resultados dessa pesquisa mostraram que, ao usar os valores de equivalentes apresentados no HCM de 1998, a estimativa do nível de serviço para as rodovias de pista dupla paulistas é distorcida.

Equivalente veicular é o número de automóveis que são removidos por um único tipo de caminhão em condições específicas de tráfego e geometria da rodovia. O automóvel, ou carro de passeio, é considerado pelo HCM como o veículo padrão de uma corrente de tráfego. Desse modo, os demais veículos são convertidos em carros de passeio equivalentes (cpe), do inglês *passenger car equivalent (pce)*. Portanto, o fator de equivalência converte o fluxo observado, expresso em veíc/h, em um fluxo de tráfego equivalente, dado em cpe/h. O conceito do equivalente veicular é baseado na equivalência entre dois fluxos de veículos, um composto somente por automóveis e outro composto por automóveis e caminhões, para mesma medida de desempenho. O HCM-2000 [TRB, 2000] definiu a densidade como medida de equivalência; porém outras medidas podem ser utilizadas, por exemplo, a velocidade e o *headway*. Elefteriadou *et al.* [1997] enfatizam a falta de consenso sobre o mais adequado mé-

todo para cálculo da equivalência veicular e que métodos diferentes produzem valores diferentes para o fator de equivalência.

Com isso, a proposta desta pesquisa de mestrado é avaliar o efeito do uso de uma medida de desempenho diferente da densidade no cálculo dos valores de equivalência para veículos pesados típicos de rodovias de pista dupla e auto-estradas no estado de São Paulo.

1.1. CONTEXTO DA PESQUISA

Este trabalho se insere em uma linha de pesquisa desenvolvida no Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pelo Professor Dr. José Reynaldo A. Setti, com vistas à avaliação do impacto dos caminhões na operação de vias e interseções. Nesta mesma linha já foram investigados os aspectos relativos ao impacto dos veículos pesados na capacidade e nível de serviço em: rodovias de pista simples [Machado Neto, 1995; Setti, 1997; Egami, 2006], rodovias de pista dupla [Demarchi, 2000] e cruzamento em nível de interseções rurais controlado por sinal de PARE [Demarchi, 1995].

Para dar continuidade à linha de pesquisa e, principalmente, atender às sugestões apresentadas por Demarchi [2000], este trabalho de mestrado complementa a avaliação do impacto de caminhões em rodovias de pista dupla, verificando a implicação do uso de medida de desempenho alternativa no cálculo do equivalente veicular.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em nove capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório o qual apresenta a proposta da pesquisa. No Capítulo 2 é apresentado o método proposto para o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado. São apresentados as etapas do método e os objetivos a serem alcançados.

O Capítulo 3 descreve o procedimento apresentado no HCM-2000 [TRB, 2000] para a análise de nível de serviço em rodovias de pista dupla e auto-estradas e apresenta a revisão

dos métodos encontrados na literatura para cálculo do equivalente veicular e as medidas de desempenho utilizadas.

O Capítulo 4 descreve o modelo de simulação CORSIM e apresenta as lógicas fundamentais que regem o movimento dos veículos, além da importância da sua calibração para representar as condições observadas em cada local.

Os Capítulos 5 e 6 apresentam a caracterização do tráfego de caminhões em rodovia paulistas de pista dupla. O Capítulo 5 trata da caracterização do fluxo de tráfego e da porcentagem de caminhões observados em dias típicos do ano, a partir de dados de tráfego em diversas praças de pedágios do estado. No Capítulo 6, a frota de caminhões típicos é caracterizada através da composição típica e da distribuição da relação massa/potência a partir de dados obtidos em balanças rodoviárias.

O capítulo 7 relata a calibração do modelo CORSIM para as condições observadas em rodovia paulistas de pista dupla. Inicialmente, foi calibrada a lógica de desempenho veicular dos caminhões, a fim de representar os caminhões típicos. Em seguida, foi calibrada a lógica de *car-following* com o propósito de refletir o comportamento dos motoristas brasileiros.

No Capítulo 8 é apresentado o método de cálculo do equivalente veicular usado nesta pesquisa, desde a geração das curvas fluxo-impedância utilizando simulação com o CORSIM calibrado até os valores dos fatores de equivalência obtidos. Os resultados obtidos foram comparados entre si pela medida de impedância usada e com os valores apresentados no HCM-2000 e no estudo anterior realizado em rodovias paulistas [Demarchi, 2000].

Por fim, o Capítulo 9 traz as conclusões desta pesquisa e sugestões para pesquisas futuras, a fim de indagar a análise do impacto de caminhões na operação de rodovias. Como resultados desta pesquisa, o Apêndice A mostra o fluxo de tráfego no dia útil típico para as praças de pedágio analisadas no Capítulo 5, enquanto o Apêndice B descreve o arquivo TSD do CORSIM e traz o código do programa implementado para extrair os dados deste arquivo.

2. MÉTODO DE PESQUISA

A meta desta pesquisa de mestrado é avaliar o efeito do uso de medida de desempenho alternativa à densidade no cálculo dos fatores de equivalência para caminhões típicos em rodovias de pista dupla e auto-estradas no estado de São Paulo. Para atingir esta meta, foram definidos três objetivos:

- Caracterizar a composição típica do tráfego e estudar o desempenho de caminhões em rodovias paulistas de pista dupla do estado de São Paulo;
- Recalibrar o modelo de simulação CORSIM; e
- Calcular fatores de equivalência para caminhões (E_T).

O método proposto para desenvolvimento desta pesquisa de mestrado consiste das seguintes etapas:

1. Revisar a bibliografia disponível;
2. Definir o método para o cálculo dos fatores de equivalência e escolher a medida de desempenho alternativa à densidade;
3. Caracterizar o fluxo de tráfego de caminhões em auto-estradas e em rodovias de pista dupla do estado de São Paulo;
4. Caracterizar o desempenho dos caminhões típicos encontrados em rodovias paulistas;
5. Calibrar os parâmetros do modelo CORSIM;
6. Calcular os fatores de equivalência para caminhões (E_T); e
7. Comparar e analisar os resultados.

A seguir, são descritas em detalhes as etapas do método de pesquisa adotado.

2.1. REVISAR A BIBLIOGRAFIA

Esta etapa do método serviu para estabelecer o estado da prática e para definir os métodos utilizados durante a pesquisa no cálculo dos fatores de equivalência, nas coletas de dados e na calibração do modelo de simulação. A revisão bibliográfica abrangeu os seguintes tópicos: nível de serviço e capacidade de rodovias de pista dupla e auto-estradas; métodos de cálculo do fator de equivalência; medidas de impedância utilizadas como critério de equivalência; desempenho de caminhões em rampa; métodos de coletas de dados; simulação de tráfego utilizando o modelo de simulação CORSIM; e calibração de modelos de simulação utilizando algoritmo genético. A revisão bibliográfica foi realizada, principalmente, através de consultas a artigos em periódicos especializados, relatórios de pesquisas e o manual americano de capacidade de rodovias – *Highway Capacity Manual* (HCM-2000). A revisão bibliográfica realizada está sintetizada no Capítulo 3.

2.2. DEFINIR O MÉTODO DE CÁLCULO DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA E A MEDIDA DE DESEMPENHO ALTERNATIVA

Um dos objetivos da revisão da literatura que trata de métodos para cálculo de fatores de equivalência foi escolher o método mais adequado para obter os fatores de equivalência para rodovias no estado de São Paulo. A revisão bibliográfica também possibilitou definir a medida de desempenho alternativa à densidade da corrente de tráfego como critério de equivalência. O Capítulo 3 apresenta com detalhes a revisão bibliográfica e os critérios que definiram a escolha do método de cálculo e da medida de impedância.

2.3. CARACTERIZAR O FLUXO DE TRÁFEGO DE CAMINHÕES EM RODOVIAS PAULISTAS DE PISTA DUPLA E EM AUTO-ESTRADAS

O escopo desta etapa foi determinar as características do tráfego de caminhões, através do volume e da composição de caminhão na corrente de tráfego, a partir de dados de conta-

gens desagregadas do tráfego. Os dados de volume forneceram a variação da porcentagem total de caminhões no tráfego, com o propósito de definir as porcentagens típicas de caminhões no cálculo dos fatores de equivalência. Os dados de distribuição dos tipos de caminhões forneceram subsídios para definir as categorias típicas de caminhões a serem consideradas no simulador CORSIM.

Os dados usados nesta etapa foram obtidos de relatórios de contagem do tráfego em praças de pedágios do estado de São Paulo, disponibilizados pela ARTESP. As contagens de tráfego forneceram um panorama da variação horária, diária, mensal e anual do tráfego em diversas praças, próximas à capital e no interior do estado. Um método para o tratamento dos dados foi proposto de modo a caracterizar o tráfego em dias úteis típico nas rodovias paulistas. Os dados obtidos em balanças rodoviárias foram usados para caracterizar os caminhões em termos etc. O Capítulo 5 descreve a caracterização dos caminhões nas rodovias estudadas.

2.4. CARACTERIZAR O DESEMPENHO DOS CAMINHÕES EM RODOVIAS

PAULISTAS DE PISTA DUPLA E AUTO-ESTRADAS

O objetivo desta etapa foi caracterizar o desempenho das configurações típicas de caminhões observadas nas rodovias, em função da desaceleração em rampa. Para esta etapa, foram utilizados dados coletados em balanças fixas e móveis instaladas em rodovias de pista simples e dupla, próximas à capital e no interior. Os dados obtidos incluem peso bruto total, potência nominal do veículo e configuração de eixos. Com base nesses dados, os caminhões observados foram estratificados nas quatro categorias que podem ser simuladas pelo CORSIM. Esta etapa está apresentada no Capítulo 6.

2.5. CALIBRAR OS PARÂMETROS DO MODELO CORSIM

O modelo de simulação de tráfego utilizado nesta pesquisa foi o CORSIM. Como o CORSIM foi desenvolvido nos EUA, os parâmetros *default* do modelo não refletem as con-

dições observadas no Brasil, pois há significativa diferença entre o comportamento dos motoristas e no desempenho dos caminhões típicos entre esses dois países [Demarchi, 2000]. Por isso, o modelo foi calibrado para as condições observadas em rodovias paulistas de pista dupla através de um processo automático, baseado em um algoritmo genético.

A calibração do modelo CORSIM foi realizada em duas etapas. Na primeira, os parâmetros de desempenho dos caminhões foram calibrados de modo a representar o comportamento da desaceleração em rampas dos caminhões observados. Na segunda etapa, foram calibrados os parâmetros da lógica de *car-following* que regem o comportamento dos motoristas no tráfego. O Capítulo 7 descreve as duas etapas do processo de calibração do CORSIM.

2.6. CALCULAR OS FATORES DE EQUIVALÊNCIA

Uma vez que o simulador foi calibrado, foram geradas as curvas fluxo-impedância para diversos cenários que representam combinações de porcentagens de caminhões, comprimento de rampa, magnitude de greide e velocidade de fluxo livre. Duas medidas de desempenho foram avaliadas: a velocidade média dos automóveis, como medida alternativa, e a densidade da corrente de tráfego, medida definida pelo HCM. Os equivalentes veiculares, calculados pelo método do equivalente médio, estão apresentados em detalhes no Capítulo 8.

2.7. COMPARAR E ANALISAR OS RESULTADOS

O objetivo desta última etapa foi avaliar o efeito de se utilizar a medida alternativa no cálculo de fatores de equivalência. Inicialmente, para cada medida de desempenho estudada, foi apresentada a variação dos equivalentes veiculares em função do comprimento da rampa, da magnitude do greide, da porcentagem de caminhões e para cada nível de serviço. Em seguida, foram avaliadas as diferenças no resultado do nível de serviço quando usados os equivalentes para caminhões baseado na velocidade dos automóveis e na densidade, apresen-

tados nesta pesquisa. Também foram comparados os resultados do nível de serviço obtido usando-se os fatores de equivalência desta pesquisa com os fatores apresentados nos estudos de Demarchi [2000] e no HCM-2000. Esta etapa é apresentada no Capítulo 8.

3. EQUIVALENTE VEICULAR PARA CAMINHÕES

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre fatores de equivalência para caminhões em rodovias com canteiro central, com ênfase em dois aspectos: (1) o procedimento básico apresentado no HCM-2000 para determinar a capacidade e nível de serviço em rodovias de pista dupla e auto-estradas; e (2) os métodos para cálculo do fator de equivalência para veículos pesados nessas rodovias.

3.1. NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA DUPLA E AUTO-ESTRADAS

O processo adotado pelo HCM-2000 para determinar o nível de serviço em segmentos básicos de auto-estradas (*freeways*) é semelhante ao adotado em rodovias de pista dupla (*multilane highways*). Inicialmente, obtém-se a curva fluxo-velocidade para a o trecho estudado, a partir das curvas básicas (Figura 3.1) e da velocidade média dos automóveis em condições de fluxo livre, denominada *free flow speed* (FFS). Embora sejam apresentadas apenas quatro curvas básicas na Figura 3.1, o HCM ressalta que, por interpolação, podem ser obtidas outras curvas fluxo-velocidade para diferentes valores de FFS.

(a) auto-estradas (*freeways*)

(b) rodovias de pista dupla (*multilane highways*)

Figura 3.1: Relação fluxo-velocidade [TRB, 2000].

A seguir, determina-se a taxa de fluxo de tráfego equivalente, em cpe/(h.faixa), que é

função do fluxo observado e das características do tráfego e da via. Com este valor, verifica-se o ponto correspondente na curva fluxo-velocidade, determinando-se em que nível de serviço a rodovia opera.

Este procedimento, chamado no HCM de análise operacional de rodovias, é definido para condições básicas do tráfego e da via. Uma das condições básicas é que a corrente de tráfego seja composta apenas por automóveis. Assim, a conversão do fluxo observado V , em veíc/h, em fluxo equivalente v_p , em cpe/(h.faixa), é dada pela seguinte equação:

$$v_p = \frac{V}{PHF \cdot N \cdot f_{HV} \cdot f_p} \quad (3.1)$$

em que: PHF : fator de pico horário;

N : número de faixas;

f_{HV} : fator de ajuste para a presença de veículos pesados no tráfego; e

f_p : fator de ajuste para tipo de motorista.

Os principais fatores de ajuste da Equação 3.1 estão relacionados à variação do fluxo dentro da hora (PHF) e a composição de veículos pesados no tráfego (f_{HV}). O fator de ajuste para veículos pesados no tráfego é calculado em função da porcentagem do veículo na corrente de tráfego e do fator de equivalência de cada tipo de veículo pesado previstos no HCM-2000:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1)} \quad (3.2)$$

em que: P_T : a porcentagem de caminhões na corrente de tráfego;

P_R : a porcentagem de veículos recreacionais;

E_T : o fator de equivalência para caminhões; e

E_R : o fator de equivalência para veículos de recreação.

O automóvel, ou carro de passeio, é considerado pelo HCM como o veículo padrão de uma corrente de tráfego. Desse modo, os demais veículos são convertidos em carros de passeio equivalentes (cpe) – do inglês *passenger car equivalent (pce)* – através dos fatores de equivalência E_T e E_R . O HCM-2000 fornece valores de equivalentes veiculares para três

situações distintas: trechos longos e homogêneos, aclives específicos e declives específicos.

Os trechos longos e homogêneos são definidos pelo relevo típico, que pode ser plano, ondulado ou montanhoso. No relevo montanhoso, os caminhões atingem a velocidade de equilíbrio e nela se mantém por significativo período do percurso. Para aclives e declives específicos, os fatores de equivalência são fornecidos em função da magnitude e comprimento da rampa e da porcentagem de caminhões, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tabela de equivalentes veiculares para aclives em rodovias de pista dupla e em auto-estradas, apresentada no HCM-2000 [TRB, 2000].

Greide (%)	Compr. (km)	Porcentagem de caminhões (%)								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	Todos	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	0,0 - 0,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
>= 2-3	> 0,4 - 0,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	> 0,8 - 1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	> 1,2 - 1,6	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	> 1,6 - 2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	> 2,4	3,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	0,0 - 0,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
> 3-4	> 0,4 - 0,8	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5
	> 0,8 - 1,2	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	> 1,2 - 1,6	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
	> 1,6 - 2,4	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
	> 2,4	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
	0,0 - 0,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
> 4-5	> 0,4 - 0,8	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	> 0,8 - 1,2	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	> 1,2 - 1,6	4,0	3,5	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	> 1,6	5,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0
	0,0 - 0,4	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
> 5-6	> 0,4 - 0,5	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	> 0,5 - 0,8	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	> 0,8 - 1,2	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	> 1,2 - 1,6	5,5	5,0	4,5	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	> 1,6	6,0	5,0	5,0	4,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
	0,0 - 0,4	4,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
> 6	> 0,4 - 0,5	4,5	4,0	3,5	3,5	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5
	> 0,5 - 0,8	5,0	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5
	> 0,8 - 1,2	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0
	> 1,2 - 1,6	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	3,5	3,5	3,5
	> 1,6	7,0	6,0	5,5	5,5	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0
	0,0 - 0,4	4,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0

A diferença entre trechos longos e homogêneos e aclives específicos é dada pelo comprimento e magnitude do aclive. Em rodovias de pista dupla, rampas com mais de 800 m e greide superior a 3%, ou rampas com mais de 1.600 m e greide igual ou inferior a 3% são tratadas como aclives específicos. Em auto-estradas, os aclives específicos são rampas com mais de 500 m e greide superior ou igual a 3%, ou rampas maiores que 1.000 m e greide

inferior a 3%.

Convém ressaltar que os fatores de equivalência do HCM-2000 foram obtidos considerando-se caminhões típicos com relação massa/potência entre 70 a 90 kg/kW em auto-estradas e de 100 kg/kW em rodovias de pista dupla; para os veículos recreacionais, a relação massa/potência considerada varia entre 20 a 40 kg/kW.

3.2. MÉTODOS DE CÁLCULO DO FATOR DE EQUIVALÊNCIA

A premissa básica para o cálculo do fator de equivalência é que, para determinado nível de impedância, o fluxo equivalente em carros de passeio tem a mesma qualidade de serviço que o fluxo de tráfego misto [Huber, 1982; Roess e Messer, 1984]. Tal aspecto resulta na igualdade das duas correntes de tráfego:

$$q_b = q_m \cdot (1 - p) + q_m \cdot p \cdot E_T \quad (3.3)$$

em que:

- q_b : fluxo básico, em cpe/h;
- q_m : fluxo misto, em veíc/h;
- $(1 - p)$: porcentagem de automóveis no fluxo misto;
- p : porcentagem de caminhões no fluxo misto; e
- E_T : o fator de equivalência para caminhões.

Na literatura, podem ser encontrados vários métodos para cálculo do fator de equivalência em rodovias de pista dupla e em auto-estradas. Os métodos são fundamentados no conceito básico de equivalência entre as correntes de tráfego, porém, como critérios de equivalência, adotam diferentes medidas de impedância. Os métodos recentes, na maioria, utilizam modelos de simulação de tráfego para representar a relação fluxo-impedância, enquanto, no passado, eram utilizados modelos analíticos. Dessa forma, os métodos foram classificados quanto ao modelo usado para determinar da relação fluxo-impedância:

- Métodos baseados em modelos analíticos; e
- Métodos baseado em modelos de simulação.

3.2.1. Métodos baseados em modelos analíticos

Os primeiros métodos de cálculo de equivalentes veiculares utilizavam modelos analíticos para quantificar a medida de impedância. Inicialmente, é apresentado o método utilizado na segunda edição do HCM [HRB, 1965], que quantificou o atraso relativo sofrido por automóveis devido à presença de caminhões na corrente de tráfego. Em seguida, são apresentados dois métodos que ajustaram determinada função fluxo-impedância: Reilly e Seifert [1969] utilizaram uma função quadrática, enquanto Fan [1990], uma função linear. Por fim, são apresentados o método de Huber [1982], que utilizou o modelo de Greenshields para representar a relação entre densidade e velocidade e, também, uma derivação deste método que considera o *headway* como medida de impedância [Krammes e Crowley, 1986].

3.2.1.1. Equivalente veicular baseado no atraso relativo

Na segunda edição do HCM [HRB, 1965], os valores dos equivalentes veiculares em rodovias de pista dupla foram baseados no atraso pois, ao contrário das rodovias de pista simples, os veículos mais rápidos são inibidos apenas pelo fluxo na mesma direção. O atraso foi quantificado pelo método de Walker, apresentado em Craus *et al.* [1980], que utiliza curvas de desempenho de caminhões de 200 lb/hp (122 kg/kW) em rampas e distribuições de velocidades diferentes para carros de passeio e caminhões [Roess e Messer, 1984]. O valor do equivalente é expresso pela razão do atraso experimentado por um automóvel devido a um caminhão d_{at} e do atraso experimentado pelo automóvel devido a outro automóvel d_{aa} :

$$E_T = \frac{d_{at}}{d_{aa}} \quad (3.4)$$

Craus *et al.* [1980] concluíram que o método dos atrasos relativos reflete mais precisamente a influência dos caminhões em rodovias rurais do que o método de Walker, baseado no número de ultrapassagens. Entretanto, Cunagin e Messer [1983] estenderam os estudos de equivalência do HCM 1965 e combinaram o método de Walker com o método dos

atrasos relativos, resultando as Equações 3.5 e 3.6, para determinar o número de carros de passeio equivalente (cpe) em rodovias de pista dupla. No método de Walker, a premissa básica considera que os veículos rápidos não são retidos durante a ultrapassagem dos veículos lentos, por isso é mais indicado para baixos volumes de tráfego:

$$E_T = \frac{N_i}{q_i} \cdot \frac{N_{auto}}{q_{auto}} \quad (3.5)$$

em que: N_i : número de ultrapassagens de carros de passeio em veículos do tipo i ;
 q_i : volume por hora de veículos tipo i ;
 N_{auto} : número de ultrapassagens de carros de passeio em carros de passeio;
 q_{auto} : volume de carros de passeio por hora;

Por outro lado, o método baseado no atraso considera que os veículos rápidos sempre sofrem retardamento por causa dos veículos lentos, resultando em filas em alguns trechos, sendo mais indicado para altos volumes de tráfego:

$$E_T = \frac{\frac{N_i}{q_i} \cdot \left(\frac{1}{u_m} - \frac{1}{u_a} \right)}{\frac{N_{auto}}{q_{auto}} \cdot \left(\frac{1}{u_{auto}} - \frac{1}{u_a} \right)} \quad (3.6)$$

em que: N_i : número de ultrapassagens de carros de passeio em veículos do tipo i ;
 q_i : volume por hora de veículos tipo i ;
 N_{auto} : número de ultrapassagens de carros de passeio em carros de passeio;
 q_{auto} : volume de carros de passeio por hora;
 u_m : velocidade média da corrente de tráfego mista;
 u_a : velocidade média da corrente de tráfego composta apenas de automóveis de alto desempenho;
 u_{auto} : velocidade média da corrente de tráfego composta apenas de automóveis.

Cunagin e Messer [1983] investigaram a influência da relação massa/potência no resultado do equivalente veicular e concluíram que os caminhões pesados têm maior impacto no tráfego do que os caminhões leves. Desta forma, reportam que uma população de caminhões com relação massa/potência média de 150 lb/hp (91 kg/kW) tem maior impacto na operação de rodovias do que uma população em que todos os caminhões possuem relação massa/potência de 150 lb/hp [Roess e Messer, 1984].

3.2.1.2. Métodos de regressão

Utilizando métodos baseados em regressão, pesquisadores ajustaram coeficientes que melhor representassem a função fluxo-impedância. Reilly e Seifert [1969] empregaram uma função quadrática para representar a relação fluxo-impedância, enquanto Fan [1990] usou uma função linear.

Reilly e Seifert [1969] observaram o tráfego em duas diferentes vias com canteiro central nos EUA, sendo uma via expressa com tráfego apenas de automóveis e outra via com tráfego misto e grande porcentagem de caminhões (80%). A partir dos dados observados em campo, os autores ajustaram uma função quadrática para representar a variação da velocidade média u em função do volume de tráfego q :

$$u = a \cdot q^2 + b \cdot q + c \quad (3.7)$$

Os coeficientes a , b e c foram determinados por um programa de ajuste polinomial, para a condição observada no tráfego de 80% de caminhões. A partir dessa curva, foram construídas curvas equidistantes para porcentagens de caminhões de 20%, 40% e 60%. Os autores construíram um nomograma que simplifica a determinação de fluxos equivalentes q_b (em cpe/h) a partir dos valores do volume observado q_m (em veíc/h) e da porcentagem de caminhões. O valor do equivalente E_T foi determinado considerando que, para uma mesma velocidade, o número carros de passeio equivalente é igual para os dois fluxos:

$$N_b = N_{auto} + N_t \cdot E_T \quad (3.8)$$

sendo:

- N_b : quantidade de automóveis no fluxo básico;
- N_{auto} : quantidade de automóveis no fluxo misto;
- N_t : quantidade de caminhões no fluxo misto; e
- E_T : fator de equivalência veicular.

Fan [1990] calculou valores do fator de equivalência para auto-estradas em Cingapura utilizando regressão linear múltipla para ajustar uma equação da capacidade da via C_b em função do volume observado q_m e das porcentagens de cada tipo de veículo p_j :

$$C_b \cdot N \cdot (q/C) = q_m \cdot \left(X_{auto} \cdot p_{auto} + \sum_j X_j \cdot p_j \right) \quad (3.9)$$

em que:

- C_b : capacidade básica da via (cpe/h.faixa);
- N : número de faixas;
- q/C : relação volume/capacidade;
- q_m : fluxo misto (veíc/h);
- X_{auto} : coeficiente para automóveis;
- p_{auto} : porcentagem de automóveis na corrente de tráfego;
- X_j : coeficiente para veículos do tipo i ; e
- p_j : porcentagem de veículos do tipo i .

A Equação 3.9 tem a forma linear do tipo $Y = \Sigma A_k \cdot X_k$, em que a variável dependente Y é o produto entre o fluxo máximo estimado C_b , em cpe/h.faixa, o número de faixas N e a relação volume-capacidade q/C . As variáveis independentes A_k correspondem aos volumes de tráfego observados para cada tipo de veículo ($p_i \cdot q_m$). Os valores de q/C foram obtidos a partir da velocidade média observada de acordo com a relação entre velocidade e volume/capacidade apresentada no HCM de 1985. O equivalente veicular E_T é obtido pela razão entre os coeficientes para caminhões X_k e o coeficiente para automóveis X_{auto} :

$$E_T = \frac{X_k}{X_{auto}} \quad (3.10)$$

3.2.1.3. Método de Huber

Huber [1982] propôs um método de cálculo de equivalentes veiculares pela relação entre os volumes das correntes básica (q_b) e mista (q_m), para um mesmo nível de impedância:

$$E_T = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{q_b}{q_m} - 1 \right) + 1 \quad (3.11)$$

Neste método, a composição do tráfego na corrente mista inclui apenas dois tipos de veículos: automóveis e caminhões. Huber recomendou que a medida de impedância utilizada esteja diretamente relacionada com o nível de serviço. Os equivalentes foram calculados adotando-se três diferentes medidas de desempenho:

- Tempo médio de viagem em um trecho da rodovia, que é uma medida de impedância que numericamente equivale à velocidade média espacial da corrente de tráfego;
- Tempo médio de viagem somente dos automóveis; e
- Tempo de ocupação, dado pelo produto do fluxo e do tempo médio de viagem, uma medida de impedância numericamente equivalente à densidade da corrente de tráfego.

Huber utilizou a relação linear entre velocidade u e densidade k do modelo de Greenshields para representar a relação fluxo-impedância. Utilizando a velocidade como medida de equivalência, conforme Figura 3.2(a), é possível expressar a relação entre as densidades do fluxo básico e do fluxo misto (k_b/k_m) em função das velocidades de fluxo livre (u_{fb} e u_{fm}) e das densidades de congestionamento (k_{jb} e k_{jm}) dos fluxos básico e misto:

$$\frac{k_b}{k_m} = \frac{k_{jb} \cdot u_{fm} \cdot (u_{fb} - u)}{k_{jm} \cdot u_{fb} \cdot (u_{fm} - u)} \quad (3.12)$$

Figura 3.2: Equivalência veicular para fluxos com mesma velocidade, baseado em Huber [1982].

A partir da relação fundamental de tráfego, verifica-se que a razão entre os fluxos para o critério da mesma velocidade é dada por:

$$\frac{q_b}{q_m} = \frac{k_b}{k_m} \quad (3.13)$$

Substituindo as Equações 3.12 em 3.13, por sua vez, na Equação 3.11, o equivalente veicular E_T é expresso por:

$$E_T = \frac{1}{p} \cdot \left[\frac{k_{jb} \cdot u_{fm} \cdot (u_{fb} - u)}{k_{jm} \cdot u_{fb} \cdot (u_{fm} - u)} - 1 \right] + 1 \quad (3.14)$$

sendo:

- p : percentagem de caminhões;
- k_{jb} : densidade de congestionamento para o fluxo básico;
- k_{jm} : densidade de congestionamento para o fluxo misto;
- u_{fb} : velocidade de fluxo livre para o fluxo básico;
- u_{fm} : velocidade de fluxo livre para o fluxo misto; e
- u : velocidade média da corrente de tráfego;

A Figura 3.2(b) mostra que os equivalentes calculados pela Equação 3.14 são máximos para fluxos baixos, decrescem com o aumento do fluxo básico q_b e crescem com a percentagem de caminhões. De acordo com a Equação 3.14, o valor do equivalente é limitado pela velocidade de fluxo livre da corrente mista u_{fm} , pois com esse valor o equivalente tende a infinito e, para valores maiores que u_{fm} , o equivalente se torna negativo.

A segunda medida de desempenho utilizada por Huber foi a velocidade média dos automóveis no fluxo misto. Essa medida implica em supor que sejam iguais a velocidade de fluxo livre no fluxo básico (u_{fb}) e a velocidade dos automóveis no fluxo misto (u_{fmb}). Neste caso, o valor do equivalente é calculado por:

$$E_T = \frac{u_{fb} \cdot k_{jb}}{u_{ft} \cdot k_{jt}} \quad (3.15)$$

Em que u_{ft} é a velocidade de fluxo livre dos caminhões e k_{jt} a densidade de congestionamento de uma corrente de tráfego composta apenas por caminhões. O valor do equivalente neste caso é constante e independe da percentagem de caminhões e do fluxo de tráfego.

Utilizando a densidade como medida de desempenho e admitindo que o modelo de Greenshields é válido, como mostra a Figura 3.3(a), Huber obteve o equivalente expresso por:

$$E = \frac{1}{p} \cdot \left[\frac{k_{jm} \cdot u_{fb} \cdot (k_{jb} - k)}{k_{jb} \cdot u_{fm} \cdot (k_{jm} - k)} - 1 \right] + 1 \quad (3.16)$$

Figura 3.3: Equivalência veicular para fluxos com mesma densidade, baseado em Huber [1982].

Observando-se a Figura 3.3(b), nota-se que os valores de equivalentes veiculares baseados na densidade são mínimos para baixos fluxos de tráfego e crescem com o aumento do fluxo e da porcentagem de caminhões. De acordo com a Equação 3.16, o valor do E_T não é definido para densidades maiores que a densidade de congestionamento no fluxo misto k_{jm} , pois, neste caso, o fluxo de tráfego na corrente básica opera abaixo da capacidade básica (C_b) enquanto na corrente mista o fluxo opera no regime congestionado. A Figura 3.4 ilustra bem esse fenômeno.

Figura 3.4: Relação fluxo-densidade para o fluxo misto e básico, com base em Huber [1982].

Huber utiliza a densidade como medida preferencial de desempenho, baseado na justificativa que, com baixos volumes de tráfego, os veículos pesados têm pouco impacto no tráfego e, com o aumento do volume, a interação entre veículos é maior e aumenta o valor do equivalente. St. John, na discussão do artigo de Huber [1982], sugere como a melhor medida

de equivalência a velocidade dos automóveis em função da relação volume/capacidade pois, neste caso, os valores dos equivalentes são independentes do fluxo, implicando em uma relação fundamental simplificada que não varia entre a curva básica e a mista.

Em outro estudo, Krammes e Crowley [1986] propuseram uma derivação do método de Huber [1982] em função do *headway* e introduziram a relação fluxo-*headway*:

$$q_i = \frac{3600}{\bar{h}_i} \quad (3.17)$$

$$E_T = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{\bar{h}_m - \bar{h}_b}{\bar{h}_b} \right) + 1 \quad (3.18)$$

O *headway* considera o comprimento do veículo mais o espaço entre os veículos em unidade de tempo. Cunagin e Chang [1982] estudaram a diferença do tempo de *headway* entre combinações de pares de veículos diferentes e concluíram que a presença de caminhões na corrente de tráfego aumenta o *headway* médio. Krammes [1985] observou que, o espaço entre veículos é delimitado pelo tipo de veículo, logo, o *headway* depende de cada combinação de pares veículos expressa em $\bar{h}_{i_{jk}}$, em que j refere-se ao veículo de interesse e k refere-se ao veículo líder. A partir da observação de quatro combinações de pares de veículos na corrente de tráfego, Krammes [1985] estudou a aleatoriedade dos tipos de veículos pela proporção que representa cada tipo, expressa pela equação:

$$\bar{h}_m = (1-p)^2 \cdot \bar{h}_{m_{pp}} + p \cdot (1-p) \cdot \bar{h}_{m_{pt}} + p \cdot (1-p) \cdot \bar{h}_{m_{tp}} + p^2 \cdot \bar{h}_{m_{tt}} \quad (3.19)$$

A Equação 3.19 foi simplificada considerando que o *headway* entre automóveis é igual tanto para o fluxo básico como para o fluxo misto ($\bar{h}_{b_{pp}} = \bar{h}_{m_{pp}}$) e que a diferença dos volumes é devida à presença de caminhões. Essa simplificação implica que os veículos de passeio na corrente mista são afetados apenas pelos caminhões. Assim, a combinação das Equações 3.18 e 3.19 resulta em:

$$E_T = \frac{1}{p} \cdot \left[\frac{(1-p) \cdot (\bar{h}_{m_{pt}} + \bar{h}_{m_{tp}} - \bar{h}_{m_{pp}}) + p \cdot \bar{h}_{m_{tt}}}{\bar{h}_{m_{pp}}} \right] \quad (3.20)$$

Esta formulação tem a vantagem de usar *headways* somente da corrente mista. Krammes [1985] descobriu que, controlando o fluxo e a velocidade da corrente, o efeito do tipo do veículo líder no espaçamento mantido por caminhões foi significativamente diferente do efeito do espaçamento mantido por carros de passeio. Caminhões mantêm um espaçamento relativamente menor quando viajam atrás de outro caminhão do que de carros de passeio; por outro lado os carros de passeio mantêm, não muito significativamente, espaçamento maior atrás de caminhões do que atrás de outro carro de passeio. Com isso adotou-se que $\bar{h}_{m_{PT}} = \bar{h}_{m_{PP}}$ e $\bar{h}_{m_{TP}} = \bar{h}_{m_{TT}}$. Assim a Equação 3.20 reduz para:

$$E_T = \frac{\bar{h}_{m_T}}{\bar{h}_{m_P}} \quad (3.21)$$

3.2.2. Métodos baseados em modelos de simulação

Os métodos mais recentes de cálculo dos fatores de equivalência utilizam modelos de simulação de tráfego para representar a relação fluxo-impedância. Os modelos matemáticos incorporados aos simuladores consideram maior número de variáveis do tráfego, representando melhor as condições do tráfego real, ao contrário dos modelos analíticos que se baseiam em simplificações a partir de dados observados [St John e Glauz, 1976]. Os métodos apresentados neste item são: o equivalente baseado na relação q/C e na velocidade, método aplicado desde a terceira edição do HCM [TRB, 1985, 1994, 1998]; o equivalente veicular baseado na capacidade básica da via [Al-Kaisy *et al.*, 2002; Al-Kaisy *et al.*, 2005]; e o método que considera mais de um tipo de caminhão na corrente de tráfego [Sumner *et al.*, 1984; Demarchi e Setti, 2003].

3.2.2.1. Equivalente veicular baseado na relação q/C

St. John e Glauz [1976] estudaram a redução da capacidade e do nível de serviço provocados por caminhões em rampas de rodovias de pista dupla. Após inúmeras simulações

de diversas combinações da velocidade operacional em função da relação volume/capacidade, da porcentagem de caminhões e da declividade da rampa, foram produzidos nomogramas como o apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Nomograma apresentado por St. John e Glauz [1976].

A equivalência dos fluxos básico e misto é dada pela Equação 3.22, em que o fluxo básico é calculado através do produto da capacidade básica C_b , em cpe/h.faixa, e da relação volume capacidade q/C .

$$C_b \cdot (q/C) = q_m \cdot (1 - p + E_T \cdot p) \quad (3.22)$$

Nesse trabalho, os autores introduziram o conceito de população típica de caminhões para considerar a variação do desempenho dos diferentes caminhões no fluxo. Após levantamento da frota nacional de caminhões nos EUA [Wright e Tignor, 1965], St. John e Glauz [1976] determinaram a população típica de veículos pesados, resultando na combinação de quatro tipos diferentes de categorias de caminhões, através da porcentagem de referência p_R :

$$p_R = p \cdot (3,16 \cdot p_{10} + 1,41 \cdot p_9 + 0,14 \cdot p_8 + 0,06 \cdot p_7) \quad (3.23)$$

St. John e Glauz [1976] alertam que os gráficos padrões (Figura 3.5) apresentados foram baseados em populações de caminhões com grande porcentagem de veículos de baixo desempenho; o fluxo de tráfego foi considerado fora do horário de pico.

Linzer *et al.* [1979] utilizaram os gráficos determinados por St. John e Glauz [1976] e, através de simulação, determinaram equivalentes veiculares para o caminhão típico com relação massa/potência de 300 lb/hp (183 kg/kW), o qual se aproxima do veículo de índice 9 da Equação 3.23. Também foram calculados equivalentes para caminhões leves com 150 lb/hp (92 kg/kW) e pesados com 350 lb/hp (215 kg/kW). Com os resultados do trabalho de Linzer *et al.* [1979], Roess *et al.* [1980] publicaram a Circular 212 divulgando novos valores de equivalentes veiculares para auto-estradas.

Baseado neste método, a terceira edição do HCM [TRB, 1985] fornece três tabelas de equivalentes em rampa, para caminhões leves 100 lb/hp (61 kg/kW), médios 200 lb/hp (122 kg/kW) e pesados 300 lb/hp (182 kg/kW). Os fatores de equivalentes apresentados nas versões seguintes do HCM (1994 e 1998) foram adaptados da versão de 1985, para refletir as inovações tecnológicas dos caminhões, utilizando a velocidade da corrente de tráfego como critério de equivalência [Webster e Elefteriadou, 1999; Demarchi, 2000].

3.2.2.2. Equivalente veicular baseado na capacidade básica da via

Os fatores de carros de passeio equivalente fornecidos pelo HCM representam o efeito de caminhões e ônibus quando o tráfego está operando em fluxo livre ou condições não saturadas. Al-Kaisy *et al.* [2002] investigaram a hipótese de o impacto de caminhões durante congestionamento ser maior que em condições de fluxo livre em rodovias no Canadá, através do equivalente veicular. Anos depois, Al-Kaisy *et al.* [2005] utilizando os dados da pesquisa anterior aplicados no simulador de tráfego INTEGRATION, determinaram valores de equivalentes em condições saturadas para diferentes greides, comprimentos de rampa e porcentagens de caminhões. O equivalente foi calculado com base na capacidade básica C_b , em cpe/h.faixa, no número de carros de passeio (N_{auto}) e no número de caminhões (N_t):

$$E_T = \frac{C_b - N_{auto}}{N_t} \quad (3.24)$$

Nessa pesquisa, foi utilizada a relação massa/potência média de 140 lb/hp (85 kg/kW). Os autores confirmaram a hipótese de Al-Kaisy *et al.* [2002] de o efeito de veículos pesados durante o congestionamento, na maioria dos casos, ser maior que o efeito em condições de fluxo não saturado, comparado aos valores apresentados no HCM-2000. Os autores observaram que, em condições de fluxo não congestionado, o efeito do comprimento da rampa tem significativo impacto no valor do E_T .

3.2.2.3. Método para mais de um tipo de caminhão na corrente de tráfego

Dois estudos propuseram a generalização do método proposto por Huber visando incorporar mais de um tipo de caminhão no tráfego para o cálculo do equivalente: Sumner *et al.* [1984] e Demarchi e Setti [2003]. O primeiro estudo propôs um método que inclui um terceiro fluxo, do veículo tipo, para obter a relação entre os fluxos. O segundo estudo avaliou a formulação apresentada por Huber [1982] e Sumner *et al.* [1984] e propôs uma formulação baseada no equivalente médio. Os métodos, utilizando simulação de tráfego, podem ser aplicados para qualquer relação fluxo-impedância.

No primeiro estudo, Sumner *et al.* [1984] simularam nove tipos de veículos diferentes e calcularam os valores do equivalente veicular para cada tipo. O método proposto consiste em três etapas:

- i. Formular a curva para o fluxo básico;
- ii. Decidir a distribuição típica dos tipos de veículos que produzem a curva mista;
- iii. Selecionar um tipo de veículo (veículo S) e um nível de fluxo de operação para simular e produzir o ponto C (Figura 3.6), tendo adicionado o volume do veículo S e removido a mesma quantidade no volume de automóveis, q_S .

Os equivalentes veiculares foram calculados pela expressão:

$$E_T = \frac{1}{\Delta p} \cdot \left[\frac{q_b}{q_S} - \frac{q_b}{q_m} \right] + 1 \quad (3.25)$$

em que:

- q_b : fluxo de carros de passeio (cpe/h.faixa);
- q_m : fluxo misto (veic/h), composto de p caminhões e $(1-p)$ carros de passeio;
- q_s : fluxo misto com o veículo tipo S , composto de Δp veículo S , p caminhões e $(1-p-\Delta p)$ carros de passeio.

Figura 3.6: Veículo-hora em função do fluxo, com base em Sumner *et al.* [1984].

Os autores utilizaram a ocupação da via como medida de desempenho que corresponde ao fluxo de veículos multiplicado pelo tempo médio de viagem para um determinado trecho. Dois outros estudos aplicaram esse método para determinação de equivalentes de caminhões. Elefteriadou *et al.* [1997] utilizaram o simulador CORSIM para determinar equivalentes para caminhões em auto-estradas, baseado na equivalência da velocidade média da corrente de tráfego. Os autores verificaram a influência de variáveis como fluxo de tráfego, porcentagem de caminhões, tipo de caminhão, declividade e comprimento de rampa no valor do E_T .

Webster e Elefteriadou [1999] aplicaram esse mesmo método, com base na densidade, para determinar equivalentes para cinco tipos de caminhões diferentes e para um único caminhão típico da frota. Os autores utilizaram o CORSIM para simular várias condições de tráfego, tais como declividade e comprimento da rampa, porcentagem de caminhões, número de faixas e velocidade de fluxo livre e, também, verificar a influência dessas variáveis no valor do E_T . Os resultados mostraram que o equivalente tende a aumentar com a taxa de fluxo, a velocidade de fluxo livre, a declividade e o comprimento da rampa. Por outro lado, o

equivalente tende a diminuir com a porcentagem de caminhões e o número de faixas. Também foi observado que a relação massa/potência e o comprimento dos veículos influenciam o valor do E_T em rampas. Baseado no método de Webster e Elefteriadou [1999], o HCM-2000 atualizou os valores dos fatores de equivalência [TRB, 2000].

No segundo estudo, Demarchi e Setti [2003] analisaram a aplicação dos dois métodos anteriores em uma corrente de tráfego composta por dois tipos de caminhões. Eles observaram que os métodos de cálculo de equivalentes não consideram o efeito da interação entre diferentes tipos de caminhões na corrente de tráfego e que essa limitação acarreta em erros significativos na estimativa de taxas de fluxos equivalentes. Simulação de tráfego microscópica (INTEGRATION) foi utilizada para determinar os equivalentes baseados na densidade. Foram calculados equivalentes para os dois tipos de caminhão e_1 e e_2 , pelo método de Huber [1982], e E_1 e E_2 , pelo método proposto por Sumner *et al.* [1984]. De acordo com Sumner *et al.* [1984] o equivalente veicular para uma classe de caminhão é calculado apenas pelo impacto marginal da substituição de certo número de carros pelo veículo tipo S na corrente. Com isso, o equivalente é subestimado porque o impacto marginal diminui com o aumento da proporção do veículo-tipo na corrente [St John, 1976]. Portanto, se houver interação entre os dois tipos de caminhões, deve-se alocar esse efeito entre os caminhões ao invés de alocar em um único tipo. Para reduzir esse problema os autores propuseram o cálculo de um equivalente médio para todos os caminhões:

$$E_m = \frac{1}{\sum_i p_i} \cdot \left(\frac{q_b}{q_s} - 1 \right) + 1 \quad (3.26)$$

Demarchi e Setti [2003] concluíram que a obtenção do E_m também implica em erros, porém menores que os outros (e_1 , e_2 , E_1 e E_2). Entretanto, esse método é aplicado para uma composição fixa de caminhões e somente o percentual total ($\sum p_i$) é variável.

Ingle [2004] aplicou o método desenvolvido por Demarchi e Setti [2003], utilizando a

densidade como medida de equivalência, para determinar o efeito de variáveis de tráfego no valor do equivalente. Ingle utilizou o INTEGRATION e simulou o efeito das condições do pavimento (fator de atrito), do limite de velocidade para os caminhões, da declividade da rampa, da potência dos caminhões, da proporção de caminhões e do nível de congestionamento. Seus resultados mostraram que a relação massa/potência tem grande efeito no valor do E_T e que os valores de equivalentes deveriam se especificados para até 60% de caminhões. Outro resultado observado foi que o limite de velocidade diferenciado para caminhões acarretou um aumento de 33% no valor do E_T , para fluxos de tráfego com 5% de caminhões. Ingle verificou que a simplificação de uma única classe de caminhão é válida para cálculo do equivalente.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram concluídas duas etapas do método de pesquisa. A primeira foi apresentar a revisão bibliográfica que estabeleceu o conceito de equivalente veicular para análise de operação de rodovias e tratar dos métodos de cálculo do fator de equivalência usados em rodovias de pista dupla e em auto-estradas. A segunda etapa foi, a partir da análise dos métodos apresentado no item 3.2, definir a medida de impedância a ser usada como critério de equivalência e o método de cálculo do fator de equivalência a ser utilizado nesta pesquisa, como descrito a seguir:

3.3.1. Variável escolhida para o critério de equivalência

A velocidade média dos automóveis foi escolhida como a medida de desempenho para cálculo do equivalente para caminhões. O próprio HCM-2000 recomenda que auto-estradas (*freeways*) e rodovias de pista dupla sejam caracterizadas por uma destas três medidas de desempenho: densidade, velocidade dos automóveis ou relação volume/capacidade. Brilon e Bressler [2004] justificam que a velocidade média dos automóveis reflete o comportamento

dos motoristas devido à presença de caminhões na corrente de tráfego. Elefteriadou *et al.* [1997] reforçam que a velocidade é a medida experimentada diretamente pelos motoristas e fornece um retrato claro de como a rodovia está operando.

3.3.2. Método de cálculo do equivalente veicular

Entre os métodos de cálculo de equivalente, optou-se por utilizar o método do equivalente médio. Segundo Demarchi e Setti [2003], os valores dos equivalentes veiculares determinados por este método apresentam erros menores do que os do método de Huber [1982] e de Sumner *et al.* [1984]. Além disso, neste método, pode ser considerada qualquer relação fluxo-impedância. O método do equivalente médio é composto de quatro etapas:

- I. Determinar a curva fluxo-impedância para o fluxo básico, composto apenas por carros de passeio, variando as taxas de fluxo;
- II. Determinar a curva fluxo-impedância para a corrente mista, composta por uma porcentagem total p de caminhões e $(1-p)$ de automóveis;
- III. Determinar, para uma mesma impedância, o fluxo básico q_b e o fluxo misto q_m ;
- IV. Calcular o equivalente veicular E_T pela seguinte equação:

$$E_T = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{q_b}{q_m} - 1 \right) + 1$$

As curvas fluxo-impedância serão obtidas através de modelo de simulação de tráfego calibrado para as condições observadas em rodovias paulistas de pista dupla. Assim, o capítulo a seguir descreve o modelo de simulação escolhido para esta pesquisa de mestrado, o CORSIM.

4. MODELO DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Modelos de simulação de tráfego são ferramentas extremamente eficientes e poderosas para a análise operacional de correntes de tráfego. A principal vantagem de seu uso é oferecer ao usuário a oportunidade de avaliar estratégias alternativas no sistema de transportes sem interferência no tráfego real [Demarchi, 2000; Kim e Rillet, 2001]. Os simuladores têm desempenhado importante papel no desenvolvimento do HCM desde a edição de 1985 [Egami *et al.*, 2004] e, recentemente, sua importância tem aumentado com a utilização em Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS) [Roess e Ulerio, 1997; Owen *et al.*, 2000].

O uso de simulação requer do usuário conhecimento das limitações do modelo e, principalmente, das teorias de fluxo de tráfego [Halati *et al.*, 1997]. Assim, o objetivo deste capítulo é apresentar os principais elementos do modelo CORSIM, escolhido para realizar as simulações desta pesquisa. A sua escolha se deu em função da disponibilidade de uma versão do *software* com a lógica de *car-following* calibrada para as condições das rodovias paulistas e por ter sido utilizado na elaboração do HCM-2000 [TRB, 2000].

4.1. O CORSIM

O CORSIM (*CORridor traffic SIMulation model*), desenvolvido na década de 70 pelo *Federal Highway Administration* (FHWA) nos EUA, consiste em um conjunto integrado de dois modelos microscópicos de simulação que representam o comportamento do tráfego em função do tempo [FHWA, 2001]. Os dois modelos são o NETSIM (*NETwork SIMulation*), utilizado para simular vias arteriais urbanas, e o FRESIM (*FREeway SIMulation*), utilizado para simular *freeways* e rodovias.

Como modelo microscópico, o CORSIM descreve o comportamento da corrente de

tráfego a partir das respostas individuais de cada veículo. O modelo também é estocástico, pois atribui características aleatórias aos motoristas, aos veículos e aos processos de tomada de decisão, permitindo uma representação mais realista da corrente de tráfego simulada [FHWA, 2001]. As características atribuídas aos motoristas definem seu comportamento (passivo ou agressivo) e as aplicadas aos veículos caracterizam seu desempenho (aceleração e velocidade) [Halati *et al.*, 1997].

O CORSIM é um dos modelos mais utilizados pela comunidade científica e profissional, devido à sua capacidade de simular sistemas combinados de vias arteriais e vias expressas (*freeways*), condições saturadas de fluxo, além de diferentes tipos de controle de interseção, geometria de via e variedade de condições do tráfego [Schultz e Rillet, 2004; Araújo, 2007]. Além disso, possui uma interface amigável com o usuário e, principalmente, é capaz de produzir uma apresentação visual de alta qualidade da simulação [Owen *et al.*, 2000; Milam e Choa, 2002], como mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1: Representação gráfica detalhada de um trecho de rodovia simulada no CORSIM

O ponto forte deste simulador é a interface com o usuário, implementada em ambiente *Windows*, através do TSIS (*Traffic Software Integrated System*). O pacote TSIS inclui, além

do simulador CORSIM, o pós-processador gráfico TRAFVU (*TRAF Visualization Utility*), através do qual é possível visualizar a animação da rede simulada, como ilustra a Figura 4.1; o TRAFED, que permite ao usuário criar rapidamente a rede de tráfego desenhando-a diretamente no ambiente gráfico e ajustar as características de cada um dos elementos criados a partir da sua seleção; e o TRANSLATOR que converte o arquivo de simulação do CORSIM (extensão TRF) no arquivo gráfico do TRAFED (extensão TNO) e vice-versa. A Figura 4.2 ilustra uma rede criada no editor gráfico TRAFED.

Figura 4.2: Ilustração do editor gráfico TRAFED do CORSIM

Como se observa na Figura 4.2, o CORSIM é baseado em um modelo de rede com nós e tramos (*links*). Os nós representam pontos onde ocorrem quaisquer mudanças nas características da via, tais como interseções e acessos, redução ou aumento no número de faixas ou alteração da magnitude do greide. Os tramos promovem a ligação entre os nós e representam a via por onde trafegam os veículos [Bloomberg e Dale, 2000]. Após a criação da rede, o arquivo gráfico (TNO) é convertido em arquivo de simulação TRF.

Para execução da simulação, é necessário o arquivo TRF. Este arquivo é composto dos dados de entrada especificados em *Record Type* (RT). Cada RT trata de parte do conjunto de entradas necessários à simulação. Alguns RTs são obrigatórios, como o de demanda de

tráfego e das características das vias, enquanto outros são opcionais, como os que armazenam os parâmetros de comportamento dos motoristas e desempenho veicular, ou específicos para o FRESIM ou o NETSIM.

Após a simulação do arquivo TRF, três arquivos são gerados: TSD, TID e OUT. O arquivo binário TSD (*Time Step Data*) descreve o estado dos veículos, incidentes e semáforos a cada unidade mínima de tempo de processamento do CORSIM – um segundo – durante toda a simulação. O Apêndice B descreve em detalhes o arquivo TSD. O arquivo binário TID (*Time Interval Data*) relata as medidas de desempenho (*measure of effectiveness – MOE*) em cada tramo da rede a intervalos de tempo predefinidos. O TID traz estatísticas detalhadas de 61 medidas de desempenho da corrente de tráfego como, por exemplo, fila média, número de paradas, consumo de combustível e emissão de poluentes dos veículos. Por fim, o arquivo texto OUT apresenta, em intervalos de tempo predefinidos, o relatório global com dez principais medidas de desempenho por faixa de tráfego de cada tramo, tais como: fluxo, densidade e velocidade média.

A versão utilizada neste trabalho foi a TSIS v. 5.1. Como as simulações desta pesquisa se referem à rodovia, o componente utilizado foi o FRESIM. No entanto, no decorrer deste trabalho o termo CORSIM faz alusão ao FRESIM. A seguir, são descritas as lógicas fundamentais do simulador e os parâmetros disponíveis para sua calibração.

4.1.1. Lógica de geração dos veículos

O CORSIM permite que os veículos sejam gerados com *headways* distribuídos de forma determinística ou estocástica. Na distribuição determinística, o *headway* entre veículos t (em segundos) é uniforme, definido em função da demanda de tráfego q (em veíc/h.faixa):

$$t = \frac{3600}{q} \quad (4.1)$$

Na forma estocástica, os *headways* podem seguir função de distribuição normal ou de

Erlang. A distribuição normal é expressa na Equação 4.2, enquanto a distribuição de *Erlang* é apresentada na Equação 4.3.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (4.2)$$

em que: $f(t)$: função densidade de probabilidade para os *headways*;
 μ : média dos *headways* (s);
 σ : desvio padrão dos *headways*; e
 t : *headways* (s).

$$f(t) = \frac{(q \cdot a)^a}{(a-1)!} \cdot t^{a-1} \cdot e^{-a \cdot q \cdot t} \quad (4.3)$$

em que: $f(t)$: função densidade de probabilidade para os *headways*;
 q : fluxo de tráfego médio por faixa (veíc/h.faixa);
 a : grau de aleatoriedade para a distribuição, variando de 1 (totalmente aleatório) a ∞ (totalmente uniforme); e
 t : *headways* (s).

Um caso especial da distribuição de *Erlang* é quando temos $a = 1$, conhecida como exponencial negativa [FHWA, 2001], expressa por:

$$f(t) = q \cdot e^{-q \cdot t} \quad (4.4)$$

A escolha do modelo de geração dos veículos é feita no RT02 (*Run Control*) no campo 8. Os códigos usados neste campo são: 0 para distribuição determinística, 1 para distribuição normal e 2 para a de *Erlang*. No campo 9 do arquivo RT02, é possível especificar o valor do grau de aleatoriedade a , quando a distribuição de *Erlang* for escolhida.

4.1.2. Lógica de locomoção veicular

O CORSIM modela o movimento dos veículos na rede a partir de algoritmos matemáticos que descrevem o comportamento dos motoristas ao tráfego e o desempenho veicular [Roess e Ulerio, 1997]. As lógicas de *car-following* e mudança de faixa levam em consideração as respostas dos motoristas ao tráfego a sua volta que, por sua vez, depende das

limitações do desempenho veicular. A partir dessas três principais lógicas de locomoção, o modelo microscópico atualiza posição, velocidade e aceleração dos veículos a cada segundo.

4.1.2.1. Lógica de car-following

O modelo utiliza a lógica de *car-following* de Pitt, desenvolvida na Universidade de Pittsburgh [Halati *et al.*, 1997]. A Figura 4.3 ilustra o conceito desta lógica que considera a interação entre dois veículos em uma mesma faixa de tráfego.

Figura 4.3: Ilustração da lógica de *car-following*

Esta lógica usa o espaçamento e a diferença de velocidade entre os veículos (líder e seguidor) como variáveis independentes. A premissa básica é que o veículo seguidor procura manter uma distância segura do veículo líder [Halati *et al.*, 1997; Roess e Ulerio, 1997]:

$$h = L + P_{11} + P_i \cdot u + b \cdot P_i \cdot \Delta u^2 \quad (4.5)$$

em que:

- h : espaçamento, distância entre para-choques dianteiros dos veículos [ft];
- L : comprimento do veículo líder [ft];
- P_{11} : constante de Pitt [ft];
- P_i : fator de sensibilidade do motorista (P_1 a P_{10}) para o veículo seguidor [s];
- u : velocidade do veículo seguidor [ft/s];
- b : constante de calibração ($b = 0,1$ se $\Delta u < 0$; senão $b = 0$) [s/ft]; e
- Δu : diferença de velocidade entre os veículos líder e seguidor [ft/s].

O primeiro termo da equação considera o comprimento do veículo líder. O segundo termo, a constante de Pitt, considera a separação mínima entre veículos, variando de 3 ft a 10 ft. O terceiro termo da equação define o comportamento do motorista, de acordo com o fator de sensibilidade. O último termo permite representar o comportamento dos motoristas devido à aproximação dos veículos, baseado em estudos empíricos [Schultz e Rillet, 2004].

Este termo só é considerado na Equação 4.5 quando a velocidade do veículo seguidor é maior do que a velocidade do veículo líder, caso contrário este termo é nulo ($b = 0$).

A lógica de *car-following* procura descrever o comportamento diferente de motorista para motorista. Para isso, o CORSIM disponibiliza dez tipos de motoristas especificados pelo fator de sensibilidade de *car-following* (P_i). Os fatores são distribuídos de forma discreta entre 1,25 s (motorista passivo) e 0,35 s (motorista agressivo) e os outros oito fatores linearmente distribuídos em intervalos de 0,10 s. O CORSIM atribui o fator de sensibilidade do motorista ao gerar o veículo na rede, que permanece constante até o final da simulação. Cheu *et al.* [1998] sugerem que o ideal seria um fator que variasse ao longo da simulação, pois os motoristas têm reações diferentes no decorrer do tempo.

Quando o *gap* é insuficiente para manter um espaçamento que evite uma colisão, o veículo seguidor desacelera até alcançar uma distância segura. Usando-se a Equação 4.5, a aceleração do veículo seguidor é calculada por:

$$a = \frac{2 \cdot (x - y - L - P_{11} - u \cdot (P_i + \Delta t) - b \cdot P_i \cdot \Delta u^2)}{\Delta t^2 + 2 \cdot P_i \cdot \Delta t} \quad (4.6)$$

sendo: x : posição do veículo líder;
 y : posição do veículo seguidor; e
 Δt : incremento de tempo (1 s).

A aceleração do veículo seguidor depende do comportamento do veículo líder, que é dado em função das condições geométricas da via (rampas, curvas e adição/redução de faixas de tráfego), analisada a distância de 500 ft (152 m) à frente do veículo líder [Roess e Ulerio, 1997]. Cabe lembrar que a aceleração do veículo seguidor, determinada pela lógica de *car-following* (Equação 4.6), é também ajustada de acordo com as limitações de desempenho do veículo e, em casos de emergência – como para evitar uma colisão –, pode ser substituída pela máxima desaceleração emergencial, assegurando uma parada segura atrás do veículo líder [Roess e Ulerio, 1997].

4.1.2.2. Lógica de mudança de faixa

A lógica de mudança de faixa avalia o risco aceitável pelo motorista que pretende mudar de faixa, usando critérios de avaliação e aceitação de *gap*. A avaliação do *gap* refere-se ao processo de verificar a distância disponível entre o veículo que deseja mudar de faixa com relação aos veículos que trafegam na faixa desejada: o *lead gap*, em relação ao veículo líder, e o *trailing gap*, em relação ao veículo seguidor, como mostra a Figura 4.4.

Figura 4.4: Ilustração da lógica de mudança de faixa

O *lead gap* é avaliado em termos da desaceleração necessária pelo veículo que realiza a mudança de faixa para manter uma distância segura do veículo líder. O *trailing gap* é avaliado em termos da desaceleração necessária para o veículo seguidor manter uma posição segura com relação ao veículo que mudou de faixa [Halati *et al.*, 1997].

A aceitação do *gap* ocorre quando o *lead gap* e o *trailing gap* são suficientes para se realizar a manobra ao comparar com o risco aceitável pelo motorista. O risco depende do tipo de mudança de faixa [Halati *et al.*, 1997; Roess e Ulerio, 1997]:

- Obrigatória (*Mandatory Lane Changing*) – o motorista aceita um alto risco para a mudança de faixa, porém sempre limitado pelo desempenho veicular. Geralmente, ocorre em condições em que uma faixa de tráfego foi removida ou bloqueada ou quando o veículo pretende sair da rede, mas encontra-se em uma faixa não favorável à sua saída;
- Arbitrária (*Discretionary Lane Changing*) – a mudança de faixa é realizada a fim de se obter uma posição mais favorável (aumentar a velocidade) ou ultrapassar um

veículo lento;

- Antecipatória (*Anticipatory Lane Changing*) – são mudanças de faixa realizadas pelos veículos que estão na rede simulada quando há interferência de veículos que entram na rede.

Esta lógica depende de fatores que quantificam o desejo e o risco do motorista em mudar de faixa, como motivação, vantagem e urgência. Entretanto, não é o objetivo deste trabalho detalhar os modelos matemáticos usados no modelo CORSIM, recomenda-se para o leitor mais interessado consultar Wicks e Lieberman [1977], Halati *et al.* [1997] e Roess e Ulerio [1997].

4.1.2.3. Lógica de desempenho veicular

Esta lógica descreve o desempenho dos veículos. O CORSIM disponibiliza nove tipos diferentes de veículos, os quais são agrupados em quatro grupos, como mostra a Tabela 4.1. O grupo *carpool* representa os automóveis com alta ocupação de passageiros, que podem usar faixas reservadas para *carpool* em vias expressas.

Tabela 4.1: Categorias de veículos do CORSIM

<i>Grupo</i>	<i>ID do veículo</i>	<i>Tipo de veículo</i>
Automóveis	1	Baixo desempenho
	2	Alto desempenho
Caminhões	3	Leves
	4	Médios
	5	Pesado
	6	Extrapesados
Ônibus	7	Convencional
<i>Carpool</i>	8	Baixo desempenho
	9	Alto desempenho

A formulação matemática desta lógica não é descrita no manual do CORSIM. Segundo Roess e Ulerio [1997], visto que o CORSIM segue seu antecessor INTRANS, a maioria das considerações do desempenho veicular é derivada do estudo de St. John e Kobett [1978], que caracterizaram os veículos típicos americanos pela aceleração máxima em

função da velocidade.

Os parâmetros de desempenho veicular do modelo são inseridos no *Record Type* RT173 (*Maximum Acceleration Table*). Este arquivo contém valores de acelerações máximas para intervalos fixos de velocidades entre 0 ft/s a 110 ft/s (120 km/h), para valores intermédios de velocidades as acelerações são linearmente interpoladas [FHWA, 2001]. A Figura 4.5 apresenta as acelerações *default* para as quatro categorias de caminhões do CORSIM.

Figura 4.5: Valores *default* dos parâmetros de aceleração para caminhões no CORSIM

Observa-se que o modelo de desempenho é simplificado e utiliza uma relação linear da aceleração em função da velocidade, como apresentado em St. John e Kobett [1978], Fancher [1983] e Bester [2000]. Os simuladores mais antigos possuem modelos matemáticos simples inseridos em seu algoritmo. Como exemplo, o INTEGRATION possuía essa mesma lógica de desempenho veicular antes da implementação do novo modelo, mais detalhado, baseado nas forças de resistência e a potência dos veículos [Demarchi, 2000].

4.2. PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DO CORSIM

O CORSIM permite que os valores dos parâmetros que definem o comportamento dos motoristas e dos veículos sejam ajustados para melhor representação do tráfego local [Roess e Ulerio, 1997]. Esses parâmetros são armazenados em arquivos RTs opcionais.

Os parâmetros dos motoristas descrevem o seu comportamento perante o tráfego através das lógicas de *car-following* e de mudança de faixa. A Tabela 4.2 descreve os

parâmetros disponíveis para ajuste, o número do arquivo e o campo onde são armazenados.

Tabela 4.2: Parâmetros ajustáveis para o comportamento dos motoristas

Arquivo	Campo	Descrição
RT68	1-10	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> de cada motorista: do tipo 1 ao 10
RT68	11	Constante de Pitt para o <i>car-following</i>
RT69	5	Tempo de reação para acelerar
RT69	6	Tempo de reação para desacelerar
RT70	1	Tempo para completar uma mudança de faixa
RT70	2	Tempo mínimo para geração de veículos
RT70	3	Aceitação de <i>gap</i> para mudança de faixa do tipo obrigatória
RT70	4	Porcentagem de motoristas que cedem o direito de passagem para veículos mudando de faixa
RT70	5	Multiplicador para o desejo de realizar uma mudança de faixa arbitrária
RT70	6	Valor limite do benefício para realizar uma mudança de faixa arbitrária
RT70	17	Desaceleração máxima do veículo líder percebida pelo seu seguidor
RT147	1-10	Porcentagem da velocidade de fluxo livre para cada motorista

O conjunto de parâmetros do arquivo RT147 (*Free-Flow Speed Percentages*) reflete o comportamento dos motoristas quanto à velocidade em condições de fluxo livre. Cada motorista apresenta comportamento diferente na condução do veículo e, além dos fatores de sensibilidade de *car-following*, o CORSIM permite certo grau de variabilidade na velocidade.

A velocidade dos veículos é atribuída ao entrar em cada tramo, de acordo com a velocidade de fluxo livre (FFS) do tramo predefinida no arquivo de simulação. Ao entrar na rede, em condições de fluxo livre, a velocidade dos veículos é igual ao produto da FFS do tramo pela porcentagem do tipo de motorista. Os valores *default* do modelo para a variabilidade da velocidade variam de 88% da FFS (motorista menos agressivo) a 112% (motorista mais agressivo), como mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Variabilidade da velocidade de fluxo livre (FFS) para cada motorista do CORSIM

Tipo de motorista	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Porcentagem da velocidade de fluxo livre (FFS)	88	91	94	97	99	101	103	106	109	112

Os parâmetros dos veículos descrevem suas características operacionais como desempenho, comprimento e ocupação de passageiros, conforme apresentados na Tabela 4.4, divididos pelo número do arquivo e o campo de preenchimento.

Tabela 4.4: Parâmetros ajustáveis dos veículos

<i>Arquivo</i>	<i>Campo</i>	<i>Descrição</i>
RT70	7-15	Máxima desaceleração não-emergencial para cada tipo de veículo (1-9)
RT71	2	Comprimento do veículo
RT71	3	Taxa de desaceleração [ft/s ³]
RT71	10	Ocupação média de passageiros
RT173	4-15	Aceleração máxima para cada velocidade (0 ft/s a 110 ft/s)

4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu brevemente os principais elementos do modelo de simulação CORSIM e as lógicas internas que regem a locomoção dos veículos. Ao final deste capítulo, foram apresentados os parâmetros ajustáveis do modelo para melhor representação das condições locais. A calibração do CORSIM está descrita em detalhes no Capítulo 7.

A seguir, é apresentada a caracterização do fluxo de tráfego em rodovias paulistas de pista dupla para compor os dados de entrada da simulação.

5. CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS PESADOS EM RODOVIAS PAULISTAS DE PISTA DUPLA

No estado de São Paulo, parte relevante da malha rodoviária é operada por concessionárias privadas, das quais uma concessão federal e doze estaduais. Segundo dados da Secretaria dos Transportes do Estado de São Paulo [2005], a malha rodoviária sob regime de concessão representa mais de 4,2 mil km de extensão (20% da malha estadual) e é responsável por cerca de 50% do volume de tráfego total do estado, em veíc.km. Desta malha concedida, 64% são rodovias de pista dupla.

Vários trechos das rodovias de pista dupla apresentam elevado fluxo de tráfego com volume significativo de caminhões. A presença de caminhões no tráfego, aliada à topografia tipicamente ondulada em boa parte do relevo paulista, ocasiona grande interação entre caminhões e automóveis, reduzindo a velocidade operacional e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade e a qualidade de operação da rodovia [Demarchi, 2000].

Para que o impacto dos caminhões na operação das rodovias possa ser devidamente avaliado, devem ser realizados estudos para determinar a participação desses veículos no tráfego. No passado, as informações do tráfego veicular, geralmente, eram limitadas a bases de dados agregados [Demarchi, 2000], como os dados de volume diário médio (VDM) compilados pelo DER [DER-SP, 2005] ou a distribuição modal da matriz de transporte de carga [CNT, 2005]. Hoje, com o investimento das concessionárias em novas tecnologias de operação, as Centrais de Controle Operacional (CCO) constantemente monitoram o tráfego nas rodovias, através de câmeras e sensores, possibilitando a obtenção de dados do tráfego mais desagregados sem a necessidade de coletas manuais, porém os dados são limitados aos locais onde os sensores estão instalados.

O objetivo deste capítulo é caracterizar o fluxo de tráfego de caminhões em rodovias paulistas de pista dupla em um dia útil típico, através da análise dos relatórios de contagens de tráfego em diversas praças de pedágio, próximas à capital e no interior do estado.

5.1. COLETA DE DADOS

Os dados foram obtidos através da ARTESP, que forneceu o banco de dados de 2005 das contagens horárias de tráfego em praças de pedágio de todo o estado de São Paulo. No total são mais de 200 planilhas eletrônicas, que foram organizadas e separadas por rodovia e por praça de pedágio através de macros, criadas pelo autor, de modo a facilitar o acesso às informações.

Figura 5.1: Rodovias selecionadas para o estudo no estado de São Paulo

Das rodovias de pista dupla disponíveis no banco de dados, três foram selecionadas para este estudo (Figura 5.1), pois algumas apresentam operação de tráfego diferenciada em dias de tráfego intenso, como no corredor Anchieta-Imigrantes. As rodovias selecionadas

ligam a capital às regiões Norte e Noroeste do estado: rodovia Washington Luiz (SP-310), via Anhangüera (SP-330) e rodovia dos Bandeirantes (SP-348).

As rodovias SP-310 e SP-330 possuem limite de velocidade para automóveis de 110 km/h, acesso não controlado e, próximos às cidades, trechos com restrição da velocidade a 90 km/h. Ambas possuem duas faixas de tráfego por sentido em toda a extensão, porém alguns trechos com faixas adicionais. A rodovia SP-348 possui três faixas por sentido de tráfego até Piracicaba (com a quarta faixa em implantação próximo à capital), limite de velocidade dos automóveis de 120 km/h e acessos controlados.

Foram analisadas 17 praças de pedágios para as três rodovias. A Figura 5.2 ilustra os locais e os marcos quilométricos de cada praça. Na SP-310, as praças localizadas no km 181, pista Sul, e no km 217, pista Norte, foram agrupadas para gerar dados de volume de tráfego bidirecional, como nas demais praças de pedágio.

Figura 5.2: Ilustração das praças de pedágio estudadas

5.2. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO TRÁFEGO VEICULAR

Na análise operacional de rodovias, foram considerados dois parâmetros que definem o comportamento do tráfego: o fluxo e a composição veicular do tráfego. A importância

desses parâmetros se deve, principalmente, à sua variação dentro da hora, do dia, da semana, do mês e do ano, além de, no mesmo local, variar entre faixas de tráfego [TRB, 2000; DNIT, 2006]. A análise dessas variações reflete a atividade econômica e social da região atendida pela via, assim como o tipo de rodovia. As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 ilustram a variação do volume e da composição do tráfego entre as praças de pedágio para as rodovias selecionadas.

Figura 5.3: Volume diário médio anual na SP-310

Figura 5.4: Volume diário médio anual na SP-330

Figura 5.5: Volume diário médio anual na SP-348

Observa-se que o volume diário médio anual (VDMA) é mais intenso nas praças de pedágio mais próximas à capital (SP-330 e SP-348) e que reduz à medida que as praças ficam mais distantes de São Paulo. A porcentagem média de caminhões no tráfego apresentou os maiores valores nessas praças (até 46%). No entanto, o VDMA é uma medida bastante agregada, pois consiste na média dos volumes diários observados em um ano inteiro incluindo-se todas as variações horárias e os dias atípicos, com fluxo intenso de veículos.

Outra forma de caracterização do tráfego veicular é a partir do volume observado na *i*-ésima hora mais carregada do ano, obtida através da ordenação decrescente dos volumes horários observados. Segundo o HCM-2000, o fluxo de tráfego estimado para o planejamento, o projeto e a operação de rodovias deve fornecer um nível de serviço adequado para várias horas do ano e apresentar viabilidade econômica. A prática recente dos EUA considera o volume horário entre a 30^a e a 100^a horas mais congestionadas do ano [TRB, 2000]. Já no Brasil, os valores para o projeto e a operação de rodovias estão entre a 30^a e a 50^a horas mais congestionadas [DNIT, 2006].

As Figura 5.6 e Figura 5.7 apresentam o volume e a porcentagem de caminhões observados para as 1.000 horas mais carregadas de 2005 em duas praças de pedágio na SP-330, uma localizada próxima à capital, no km 26, e outra no interior do estado, no km 405.

Figura 5.6: Volume de tráfego nas 1.000h mais carregadas na capital, SP-330 km 26

Figura 5.7: Volume de tráfego nas 1.000h mais carregadas no interior, SP-300 km 405

Para a 50^a hora, os volumes observados na SP-330 foram 2.029 veic/h para o km 26 e 451 veic/h para o km 405, enquanto a porcentagem de caminhões variou de 3% a 25% no km 26 e de 5% a 27% para o km 405. Constatou-se que, para as 50 horas mais carregadas do ano, os fluxos de tráfego observados ocorreram em feriados, como a Páscoa e o Ano Novo, quando há aumento significativo de automóveis. De modo geral, observa-se que, para as 1.000 horas mais carregadas do ano, a variação da porcentagem de caminhões é menor nas praças de pedágio localizadas mais próximas da capital, comparado com as localizadas no interior. Na praça de pedágio mais próxima à capital (Figura 5.6) esta variação foi de 3% a 33%, enquanto na praça mais afastada (Figura 5.7), a variação foi de 5% a 53% de caminhões.

A análise do comportamento do tráfego a partir do VDMA ou do volume de tráfego na *i*-ésima hora mais congestionada mostrou-se ineficiente para os propósitos de caracterizar o fluxo de caminhões tipicamente observado nas rodovias. Por isso, o item 5.2.1 apresenta um método para determinar fluxos de tráfego em dias úteis típicos, sem a influência dos feriados.

5.2.1. Determinação do fluxo de tráfego em um dia útil típico

O processo proposto para determinação do dia útil típico considera a média dos dias úteis, sem a interferência de feriados ou datas festivas que, via de regra, alteram o tráfego

veicular. Essa análise permite avaliar, em princípio, o que ocorre na maior parte do tempo nas rodovias. No Brasil, Gomes [2004] utilizou critério semelhante para determinar o volume de tráfego em uma semana típica no sistema Anhangüera-Bandeirantes. O critério utilizado por Gomes foi eliminar apenas os feriados e os dias em que os sensores de contagem veicular falharam. A seguir é apresentado o método proposto para definir o dia útil típico.

5.2.1.1. Critérios para definir o dia útil típico

A definição proposta do dia útil típico baseia-se em três critérios criados com base em dados de tráfego dos anos de 1999 a 2005. Os dados de 1999 a 2004 representam contagens de alguns meses do ano fornecidos por cinco concessionárias do estado, enquanto que os dados de 2005 foram a base de dados disponibilizada pela ARTESP.

A primeira etapa consiste em definir os feriados do ano que devem ser eliminados do banco de dados por causarem maior variação no fluxo de tráfego. Assim, foram definidos os feriados nacionais e o feriado estadual de 9 de julho, como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Feriados considerados no ano de 2005

<i>Mês</i>	<i>Feriados em 2005</i>
Janeiro	1 (Ano Novo)
Fevereiro	8 (terça de carnaval*)
Março	27 (Páscoa*)
Abril	21 (Tiradentes)
Maio	1 (Dia do Trabalho) 26 (Corpus Christi*)
Julho	9 (Revolução Constitucional)
Setembro	7 (Dia da Independência)
Outubro	12 (N.S. Aparecida)
Novembro	2 (Finados) 15 (Proclamação da República)
Dezembro	24-25 (Natal) 31 (Ano Novo)

* Feriado móvel

É importante ressaltar que existem feriados locais, festas religiosas e eventos culturais que também alteram o fluxo veicular em cada região. Sua inclusão, porém, implicaria em analisar cada local isoladamente. O propósito maior do método proposto é considerar as datas

mais significativas do ano de modo que possa ser aplicado em qualquer região.

A segunda etapa consiste em definir os demais dias da semana que são afetados por cada feriado. Por exemplo, se um feriado ocorrer em uma quarta-feira, a terça-feira e a quinta-feira também sofrem alteração significativa no fluxo de tráfego, de acordo com a análise feita no banco de dados, e devem ser eliminados do banco de dados. A Tabela 5.2 apresenta o critério utilizado para definir os dias afetados pelo feriado.

Tabela 5.2: Critério proposto para definir os dias afetados pelos feriados

Se o feriado ocorrer no(a)...	Dias da semana eliminados
Domingo (dom)	sáb – dom – seg
Segunda-feira (seg)	sex – sáb – dom – seg – ter
Terça-feira (ter)	sex – sáb – dom – seg – ter – qua
Quarta-feira (qua)	ter – qua – qui
Quinta-feira (qui)	qua – qui – sex – sáb – dom
Sexta-feira (sex)	qui – sex – sáb – dom
Sábado (sáb)	sex – sáb – dom

A aplicação dessas duas etapas fornece dias do ano em que a interferência dos feriados é mínima. Como exemplo, a Figura 5.8 apresenta os gráficos do volume de tráfego médio para cada dia da semana, de segunda a domingo, na praça de pedágio da SP-330 no km 152.

Figura 5.8: Fluxo de tráfego para cada dia da semana na SP-330 km152

Analisando-se o fluxo de tráfego médio em cada dia da semana, nota-se que as terças, quartas e quintas-feiras apresentam comportamento do tráfego semelhante durante todo o dia, o que não ocorre com os demais dias da semana. Assim, baseada nessa semelhança, a terceira e última etapa foi determinar a média dos volumes horários somente nas terças-feiras, quartas-feiras e quintas-feiras úteis do ano. Com isso, obteve-se o comportamento do tráfego em um dia útil típico. As figuras a seguir ilustram o exemplo para duas praças de pedágio, uma próxima à capital (Figura 5.9) e outra no interior (Figura 5.10). No Apêndice A, são apresentados os dias úteis típicos para todas as 17 praças de pedágio analisadas nas três rodovias.

Figura 5.9: Dia útil típico em uma praça próxima à capital: SP-348, km 36

Figura 5.10: Dia útil típico em uma praça afastada da capital: SP-330, km 215

Observando-se o dia útil típico em cada praça de pedágio, nota-se que as maiores participações dos caminhões no tráfego geralmente ocorrem nas noites e madrugadas, com valores acima de 80% do tráfego por causa da redução do fluxo de automóveis e dos baixos volumes observados. Entretanto, o tráfego de caminhões é mais intenso durante o dia, principalmente no horário entre 7:00 e 20:00, como mostram a Figura 5.9 e a Figura 5.10. Dessa forma, o impacto dos veículos pesados no tráfego é maior durante esse período do dia, devido a maior interação entre automóveis e caminhões. Entre 7:00 e 20:00, a porcentagem de caminhões observada variou de 17% a 57%. Logo, para a análise do impacto de veículos pesados no tráfego, seria interessante considerar porcentagens de caminhões no tráfego de até 60%. Esta constatação questiona os valores de equivalente veicular para caminhões apresentados no HCM-2000, que considera no máximo 25% de caminhões no tráfego e sugere utilizar 10% de caminhões em rodovias rurais na falta de dados de campo.

Determinada a participação total dos caminhões no tráfego de rodovias paulistas de pista dupla, a próxima etapa é conhecer quais as composições típicas de caminhões circulam nas rodovias paulistas.

Nos pedágios, os caminhões são classificados pelo número de eixos em contato com o pavimento, com uso de cinco categorias para classificação: 2 eixos, 3 eixos, 4 eixos, 5 eixos e 6 ou mais eixos. A Figura 5.11 apresenta a média da composição de caminhões utilizando a

classificação dos pedágios. As praças de pedágio localizadas no marco quilométrico inferior ao km 100 foram definidas como “capital” e as demais como “interior”.

Figura 5.11: Comparação da média da composição de caminhões em praças de pedágio localizadas na capital e no interior

Esta é uma classificação grosseira para análise da composição típica de caminhões no tráfego, pois há caminhões que trafegam vazios e erguem um ou mais eixos para redução dos custos com pedágio. Desse modo, a classificação adotada no pedágio pode não representar fielmente as configurações de caminhões que realmente trafegam nas rodovias.

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método do dia útil típico apresentou o volume horário tipicamente observado em rodovias paulistas de pista dupla. Observou-se que das 7:00 às 20:00 os caminhões causam maior impacto no tráfego devido à maior interação com os automóveis. Nesse período, a porcentagem de caminhões variou de 17% a 57%. Portanto, sugere-se que os equivalentes veiculares para rodovias paulistas de pista dupla sejam calculados para porcentagens de caminhões de até 60%, como observado por Ingle [2004].

A análise das composições de caminhões a partir dos dados das praças de pedágio revelou-se ineficiente devido à classificação apresentada. Assim, o Capítulo 6 apresenta a caracterização da frota de caminhões em rodovias paulistas a partir de dados de balanças.

6. CARACTERIZAÇÃO DA FROTA DE CAMINHÕES EM RODOVIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

O objetivo deste capítulo é quantificar e caracterizar os caminhões típicos que trafegam atualmente nas rodovias do estado de São Paulo, quanto a sua parcela de participação na composição do tráfego e, principalmente, a sua relação massa/potência a partir de dados coletados em balanças rodoviárias.

6.1. DESEMPENHO DOS CAMINHÕES

A relação massa/potência está relacionada ao desempenho de veículos automotores e, por isso, afeta diretamente a perda de velocidade dos caminhões em rampas ascendentes. O grande interesse na caracterização da relação massa/potência dos caminhões brasileiros reside no fato de esse parâmetro constituir um dos dados de entrada dos principais modelos de simulação de tráfego, tais como TWOPAS, TRARR e INTEGRATION.

No Brasil, os primeiros esforços no sentido de determinar relações massa/potência típicas para caminhões remontam à década de 1970, quando o DNER estimou a relação massa/potência com base nos dados de potências nominais dos fabricantes e em testes efetuados na BR-277, no Paraná [Kabbach, 1992]. Nesse estudo, foi verificado que os veículos dotados de terceiro eixo representavam entre 40% e 60% da frota nacional. Além disso, estimou-se a relação massa/potência de 180 kg/kW como representativa da frota nacional de caminhões [DNER, 1979].

No início da década de 1990, com base em dados de massa bruta total e de potência nominal publicados na Revista Transporte Moderno, Kabbach [1992] verificou que a relação massa/potência de 180 kg/kW continuava a ser um valor representativo para a frota nacional

de caminhões. Contudo, como esse estudo não se baseou em dados obtidos em rodovias, existe a possibilidade de a relação massa/potência obtida não refletir o desempenho real dos veículos da época [Melo, 2002].

Os estudos mais recentes que tratam da caracterização da relação massa/potência dos caminhões brasileiros incluem os realizados por Demarchi [2000], com dados coletados entre 1997 e 1998 em balanças instaladas na Rodovia Anhangüera (SP-330); por Melo [2002], com dados coletados em 2000, em balanças instaladas em uma rodovia de pista simples (SP-225); e por Demarchi e Pierin [2001], com dados sobre caminhões canavieiros coletados em 1995 pelo DER-SP, com balanças móveis na região de Ribeirão Preto. Dos dois primeiros estudos, o trabalho de Demarchi [2000] é o mais abrangente, pois apresenta 6.744 dados de pesagens.

6.1.1. Coleta de dados

Para determinação da relação massa/potência, foram obtidos dados sobre a massa e o modelo dos caminhões em balanças rodoviárias, fixas e móveis, no estado de São Paulo. As referidas balanças realizam pesagem dinâmica dos caminhões, com verificação da massa de cada eixo isolado, como também da massa de grupos de eixos e da massa bruta total dos veículos. Todas as coletas foram realizadas em dias úteis.

Durante as coletas, foram utilizadas duas câmeras de vídeo. A primeira câmera foi instalada logo à frente do local de pesagem, registrando todos os caminhões que realizavam a pesagem. Junto a esta câmera, um observador falava e anotava as características de cada caminhão, como: marca, modelo, configuração de eixos, número de eixos erguidos e potência nominal do motor – quando visível. A gravação da voz do observador permitiu obter os dados que não foram possíveis serem anotados durante a coleta. A segunda câmera foi instalada na via que dá acesso à balança com a finalidade de determinar o comprimento dos veículos através de pontos demarcados no próprio local. Esses pontos foram marcados a cada 5 m de distância, com uso de uma trena, durante os primeiros instantes da filmagem. Ao assistir a

filmagem, as distâncias pré-definidas foram marcadas no monitor para ser possível estimar o comprimento de cada veículo. Cabe lembrar que algumas operadoras das balanças, no seu relatório de pesagem, fornecem o comprimento do veículo obtido através de sensores. Ao final da coleta, a operadora da balança forneceu o relatório das pesagens do dia.

No laboratório, foram consultados *websites* e catálogos de cada marca de caminhão para determinar a potência máxima nominal dos modelos observados. Os modelos de caminhões que não foram identificados receberam a potência mais representativa da categoria a que pertencem. Como estes caminhões foram inferiores a 3% da amostra em cada local de coleta, admitiu-se que esta suposição não invalidaria o dado observado, dado o pequeno número de caminhões não identificados [Archilla e de Cieza, 1996]. Obtidas a massa e a potência nominal, foi determinada a relação massa/potência de cada caminhão.

6.1.1.1. Nomenclatura dos caminhões

Como a frota nacional de caminhões é bastante diversificada [Demarchi, 2000], foi necessário adotar uma nomenclatura para distinguir as diversas configurações de caminhões. Na literatura, cada trabalho apresenta uma denominação diferente, utilizando apenas números ou uma combinação de letras e números. Todas as nomenclaturas são baseadas na configuração de eixos do veículo.

Demarchi [2000] utilizou uma nomenclatura mais simples, apenas com números que representam a quantidade de eixos e o sinal “+” para indicar veículo articulado. Widmer [2004] apresentou uma nomenclatura mais estruturada, baseada na configuração dos eixos e no tipo de engate entre as combinações de carga, representada por letras e números. Cada letra representa um tipo de engate entre as unidades do veículo, enquanto os números, a quantidade de eixos de cada unidade. O DNIT [2006] adotou uma nomenclatura utilizando três caracteres (dois números e uma letra) para identificar cada configuração. A letra “C” representa caminhões rígidos; a letra “S” representa um semi-reboque; a letra “I” um semi-reboque com

eixos igualmente espaçados, enquanto o “J” um semi-reboque com espaçamento diferente entre os eixos; por fim o “T” representa dois semi-reboques.

A Tabela 6.1 compara as três nomenclaturas apresentadas para algumas configurações de caminhões encontrados nas rodovias.

Tabela 6.1: Comparação entre as nomenclaturas das configurações de caminhões

<i>Eixos</i>	<i>Composição</i>	<i>Nomenclatura</i>		
		<i>Demarchi [2000]</i>	<i>Widmer [2004]</i>	<i>DNIT [2006]</i>
2		11	U2	2C
3		12	U3	3C
4		11+2	2S2	2S2
5		11+3	2S3	2S3
5		11+111	2S3 _e	2I3
5		11+12	2S1 _e 2	2J3
6		12+3	3S3	3S3
7		12+2+2	3S2A2S2	3T4

Como a nomenclatura adotada pelos operadores das balanças e pelos órgãos de transportes também não é padronizada, optou-se usar a nomenclatura adotada pelo DNIT; primeiramente, por ser mais simples para a prática da coleta de dados – definida por apenas três caracteres – e, segundo, por ter sido a mesma utilizada pela AutoBA_n, concessionária responsável pela operação dos trechos onde cerca de 90% dos dados foram coletados.

6.1.2. Caminhões típicos em rodovias paulistas de pista dupla

Para obtenção da composição típica do tráfego e a distribuição da relação massa/potência dos caminhões em rodovias paulistas de pista dupla, foram realizadas coletas em balanças instaladas em diferentes locais do estado. A Tabela 6.2 apresenta a amostra e a frequência obtidas em rodovias de pista dupla, assim como, local, data e duração das coletas.

Tabela 6.2: Dados coletados em balanças rodoviárias de pista dupla

<i>Concessionária</i>	<i>Local</i>	<i>Data</i>	<i>Duração</i>	<i>Amostra</i>	<i>Frequência</i>
AutoBAn	SP-330 – km 37	2/mar/2005	3 horas	787	12,6%
	SP-330 – km 53	1/mar/2005	3 horas	968	15,5%
	SP-348 – km 40	9/mar/2005	3 horas	1.010	16,2%
	SP-348 – km 58	8/mar/2005	5 horas	1.901	30,4%
Centrovias	SP-225 – km 224	28/set/2004	4 horas	192	3,1%
	SP-310 – km 200	12/ago/2005	4 horas	834	13,3%
Intervias	SP-330 – km 208	7/out/2004	3 horas	209	3,3%
	SP-330 – km 208	16/fev/2005	3 horas	352	5,6%
TOTAL			28 horas	6.253	100,0%

Os dados das rodovias de pista dupla foram agrupados nos caminhões mais representativos da amostra, conforme a Tabela 6.3, com a respectiva amostra, frequência relativa, comprimento médio e potência observada. Foram consideradas configurações mais representativas aquelas com frequência relativa superior a 1% da amostra total observada.

Tabela 6.3: Configurações representativas nas rodovias de pista dupla

<i>Eixos</i>	<i>Tipo</i>	<i>Amostra</i>	<i>Frequência relativa</i>	<i>Comprimento médio (m)</i>	<i>Potência nominal</i>		
					<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Média</i>
2	2C	1.881	30,1%	6,9	76 cv (56 kW)	310 cv (228 kW)	138 cv (101 kW)
3	3C	1.809	28,9%	9,0	80 cv (59 kW)	400 cv (294 kW)	180 cv (132 kW)
4	2S2	206	3,3%	18,2	130 cv (96 kW)	420 cv (309 kW)	318 cv (234 kW)
5	2S3	1.527	24,4%	15,0	180 cv (132 kW)	450 cv (331 kW)	348 cv (256 kW)
5	2I3	71	1,1%	15,3	291 cv (214 kW)	420 cv (309 kW)	349 cv (257 kW)
6	3S3	412	6,6%	15,4	140 cv (103 kW)	460 cv (338 kW)	370 cv (272 kW)
7	3T4	244	3,9%	19,2	340 cv (250 kW)	450 cv (331 kW)	386 cv (284 kW)
Outros		103	1,6%				
TOTAL		6.253	100,0%				

Na Tabela 6.3, observa-se que os caminhões rígidos (2C e 3C) representam 59% da frota em rodovias de pista dupla, enquanto os veículos articulados (os demais) são 41%. Dentre os articulados, o 2S3 foi o mais representativo da amostra (60%) e os CVCs de sete eixos (3T4) representam 9% dos caminhões articulados e 4% do total.

A comparação desta amostra com a obtida há 7 anos por Demarchi [2000], permite afirmar que, em rodovias de pista dupla, foram mantidas as configurações de caminhões

representativas. Entretanto, algumas configurações sofreram alterações significativas na frequência observada. Por exemplo, a configuração 2C aumentou de 17,7% para 30,1%, entre 2000 e 2007. Em contrapartida, a configuração 3C sofreu redução substancial, passando de 48,6% para 28,9%. Especial atenção deve ser dada à configuração 3T4, que não foi observada em 2000 e, em 2007, representa 3,9% da amostra.

O aumento de caminhões rígidos de dois eixos (2C) pode ser atribuído à presença de grandes centros de distribuição de carga localizados próximos à capital e a mobilidade deste veículo comercial em grandes áreas urbanas. Por outro lado, o aumento significativo dos caminhões de sete eixos (3T4) pode ser atribuído à aprovação da Resolução 164/2004 [CONTRAN, 2004], na qual as combinações de veículos de carga (CVC) de 45 a 57 toneladas ficam dispensadas de trafegar portando a Autorização Especial de Trânsito, antes obrigatória pela Resolução 68/98 [CONTRAN, 1998].

A distribuição acumulada da relação massa/potência para as configurações mais representativas em rodovias de pista dupla (Tabela 6.3) é apresentada na Figura 6.1.

Figura 6.1: Distribuição acumulada da relação massa/potência para a amostra observada em rodovia de pista dupla

6.1.2.1. Análise da relação massa/potência em rodovias de pista dupla

A Figura 6.2 permite comparar a distribuição da relação massa/potência para todos os

dados observados em rodovias de pista dupla neste trabalho com os de Demarchi [2000]. A figura mostra, também, a relação massa/potência típica nos EUA para rodovias de pista dupla (*multilane*), 100 kg/kW, e auto-estrada (*freeway*), 75 a 90 kg/kW, apresentada no HCM-2000.

Figura 6.2: Distribuição da relação massa/potência para todos os dados em rodovias de pista dupla

Em comparação aos dados obtidos por Demarchi [2000], observa-se nitidamente que a relação massa/potência dos caminhões em rodovias paulistas de pista dupla melhorou. Em 2000, mais de 70% dos caminhões paulistas apresentavam relação massa/potência maior do que 100 kg/kW – valor usado pelo HCM para rodovias de pista dupla. Neste trabalho, esta diferença reduziu, com apenas 43% dos caminhões com relação massa/potência maior do que 100 kg/kW. Os valores do 50º e do 85º percentis da relação massa/potência observados para amostra total deste trabalho são de 88 kg/kW e de 164 kg/kW, respectivamente. A média da distribuição é de 105 kg/kW, próxima ao valor do HCM-2000.

6.1.3. Caminhões típicos em rodovias de pista simples

Para complementar a análise de caminhões típicos que trafegam em rodovias paulistas e verificar possíveis diferenças entre tipos de rodovias, foram realizadas coletas de dados em rodovias de pista simples. A Tabela 6.4 apresenta os locais, as datas, a duração, a amostra e as

freqüências das coletas realizadas.

Tabela 6.4: Dados coletados em balanças rodoviárias de pista simples

<i>Jurisdicção</i>	<i>Local</i>	<i>Data</i>	<i>Duração</i>	<i>Amostra</i>	<i>Freqüência</i>
DER – Araraquara	SP-255 – km100	16/dez/2005	4 horas	89	11,5%
DER – Ribeirão Preto	SP-253 – km169+450	22/nov/2005	3 horas	262	33,7%
	SP-253 – km169+700	22/nov/2005	4 horas	426	54,8%
TOTAL			11 horas	777	100,0%

As composições mais representativas, com freqüência superior a 1,0% do total, em rodovias de pista simples são apresentadas na Tabela 6.5, com a freqüência da amostra e a potência mínima, máxima e média observadas.

Tabela 6.5: Configurações representativas em rodovias de pista simples

<i>Eixos</i>	<i>Tipo</i>	<i>Amostra</i>	<i>Freqüência relativa</i>	<i>Potência nominal</i>		
				<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Média</i>
2	2C	88	11,3%	85 cv (63 kW)	214 cv (157 kW)	142 cv (104 kW)
3	3C	185	23,8%	120 cv (88 kW)	360 cv (265 kW)	164 cv (121 kW)
4	2S2	15	1,9%	190 cv (140 kW)	400 cv (294 kW)	324 cv (238 kW)
5	2S3	316	40,7%	291 cv (214 kW)	420 cv (309 kW)	351 cv (259 kW)
5	2J3	14	1,8%	320 cv (235 kW)	408 cv (300 kW)	362 cv (266 kW)
6	3S3	64	8,2%	320 cv (235 kW)	435 cv (320 kW)	371 cv (273 kW)
7	3T4	77	9,9%	354 cv (260 kW)	435 cv (320 kW)	385 cv (283 kW)
Outros		18	2,3%			
TOTAL		777	100,0%			

Os caminhões rígidos (2C e 3C) em rodovias de pista simples representaram 35% do total e os articulados (os demais) 65%. A configuração 2S3 foi a mais representativa da amostra, com mais de 40% do total, e 63% dos caminhões articulados. A combinação 3T4 é mais expressiva em rodovias de pista simples com cerca de 10% da amostra. Apenas as configurações 2I3 e 2J3 não foram representativas nos dois tipos de rodovias. A Figura 6.3 apresenta a distribuição da relação massa/potência para as configurações mais representativas em rodovias de pista simples.

Figura 6.3: Distribuição acumulada da relação massa/potência em rodovia de pista simples

6.1.3.1. Comparação entre caminhões típicos em rodovias de pista dupla e de pista simples

A Figura 6.4 apresenta a comparação da composição típica de caminhões, em função do número de eixos, para os dois tipos de rodovias.

Observações:

- a) 2 eixos: caminhões 2C;
- b) 3 eixos: caminhões 3C;
- c) 4 eixos: caminhões 2S2;
- d) 5 eixos: caminhões 2S3 e 2I3 (pista dupla), caminhões 2S3 e 2J3 (pista simples);
- e) 6 eixos: caminhões 3S3;
- f) 7 eixos: 3T4;
- g) Outros.

Figura 6.4: Comparação dos caminhões típicos em rodovias de pista dupla e simples

Nota-se que os caminhões de cinco eixos têm participação significativa no tráfego em rodovias de pista simples. Em rodovias de pista dupla, os caminhões rígidos de dois e três eixos são os mais expressivos com 30,1% e 28,9%, respectivamente. Isso mostra que em rodovias de pista simples há maior participação dos caminhões mais longos, com cinco eixos a sete eixos; em rodovias de pista dupla, por outro lado, há maior concentração de veículos

menores, com dois eixos a quatro eixos.

A Figura 6.5 apresenta a comparação, entre rodovias de pista dupla e de pista simples, da distribuição acumulada da relação massa/potência.

Figura 6.5: Distribuição da relação massa/potência entre rodovias de pista dupla e de pista simples

Com o propósito de verificar se as duas rodovias apresentam a mesma distribuição da relação massa/potência, foi realizado o teste de *Kolmogorv-Smirnov* para duas amostras. Como hipótese nula (H_0) foi considerada que as duas rodovias apresentam a mesma distribuição acumulada da relação massa/potência. A diferença limite para a distribuição acumulada das duas amostras, com $\alpha = 5\%$, foi de 0,0517 e a diferença máxima encontrada foi de 0,1057. Assim, independentemente da forma da distribuição da população, pode-se concluir com 95% de confiança que a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, a distribuição acumulada da relação massa/potência observada em rodovias de pista dupla é diferente da observada em rodovias de pista simples.

6.2. CATEGORIAS TÍPICAS

De acordo com os dados apresentados nos itens 6.1.2 e 6.1.3, seriam sete as categorias mais representativas dos caminhões observados em rodovias paulistas. Entretanto, alguns

modelos de simulação de tráfego rodoviário, tais como o TWOPAS, para rodovias de pista simples, o CORSIM e o INTEGRATION, para pista dupla, permitem ao usuário especificar no máximo até quatro categorias de caminhões a serem utilizadas nas simulações. Por isso, a Tabela 6.6 apresenta uma proposta de divisão em quatro categorias típicas baseada na similaridade das distribuições acumuladas da relação massa/potência observada em rodovias de pista dupla. A Figura 6.6 mostra a distribuição da relação massa/potência para as quatro categorias típicas de caminhões sugeridas.

Tabela 6.6: Sugestão para categorias de caminhões típicos em rodovias de pista dupla

<i>Classe</i>	<i>Eixos</i>	<i>Caminhões</i>	<i>Frequência</i>	<i>Compr. Médio (m)</i>	<i>Massa Média (kg)</i>	<i>Massa/Potência Média (kg/kW)</i>
Leves	2	2C	30%	7	6.795	67
Médios	3 e 4	3C, 2S1 e 2S2	33%	10	14.928	109
Pesados	5 e 6	2S3, 2I3 e 3S3	33%	15	32.551	126
Extra-pesados	7 ou mais	3T4	4%	19	49.435	174

Figura 6.6: Distribuição da relação massa/potência para as categorias típicas de caminhões

6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tráfego das combinações de veículos de cargas (CVCs), veículos com maior número de eixos, nas rodovias vem aumentando nos últimos anos. A análise dos dados coletados em oito balanças instaladas em rodovias paulistas de pista dupla mostrou que a participação desse tipo de veículo na composição de veículos passou de 0% em 2000 para 4% do total em 2007.

Em rodovias de pista simples, a participação das CVCs no tráfego foi de 10% da amostra.

Os dados coletados indicam que, de modo geral, a relação massa/potência dos caminhões paulistas melhorou comparando com os dados disponíveis do estudo similar realizado em 2000. Essa melhora se deve mais ao aumento da potência dos motores dos caminhões mais novos que à diminuição da massa bruta total. Ainda que essas conclusões não possam ser aplicadas em trechos onde a fiscalização seja inexistente ou esporádica, é inegável existir certa tendência da redução da relação massa/potência dos caminhões no Brasil. Como exemplo, a relação massa/potência média da amostra total obtida em rodovias de pista dupla é de 105 kg/kW, próxima ao valor do caminhão típico adotado pelo HCM-2000 (100 kg/kW).

A comparação da frota típica de caminhões em rodovias de pista dupla e rodovias de pista simples, no estado de São Paulo, mostrou-se diferente. Quanto à composição típica em função do número de eixos, a frequência dos caminhões mais longos é mais expressiva em rodovias de pista simples, enquanto os caminhões menores têm maior participação no tráfego em rodovias de pista dupla. Quanto à distribuição da relação massa/potência, foi apresentada a diferença estatística entre as distribuições para os dois tipos de rodovias, com base no teste de *Kolmogorv-Smirnov* para duas amostras.

Ao final deste capítulo, complementando o Capítulo 5, apresentou-se uma sugestão para divisão da frota de caminhões em quatro categorias típicas para utilizar em simulação de tráfego usando o modelo CORSIM. Assim, o Capítulo 7 apresenta a calibração do modelo CORSIM para as condições observadas em rodovias paulistas de pista dupla.

7. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CORSIM

A calibração de um modelo de simulação é um processo em que o usuário ajusta os valores dos parâmetros do modelo, avalia se o resultado gerado pelo simulador é aceitável quando comparado com dados empíricos e verifica a capacidade de reproduzir o comportamento do tráfego observado [Hellinga, 1998; Ma e Abdulhai, 2002; Egami *et al.*, 2004]. O usuário deve sempre realizar a calibração e a validação do modelo de simulação, a fim de assegurar que as condições do tráfego local e do comportamento dos motoristas sejam reproduzidas com fidelidade [Helinga, 1998]. A maioria dos modelos de simulação foi desenvolvida em outros países e os parâmetros *default* dos modelos não refletem as condições do tráfego no Brasil [Araújo, 2007]. Então, o principal desafio no processo de calibração consiste em conseguir os melhores valores para a grande quantidade de parâmetros contidos nos simuladores [Toledo e Koutsopoulos, 2004].

O objetivo deste capítulo foi calibrar o modelo de simulação de tráfego CORSIM para as condições observadas em rodovias paulistas de pista dupla. Para o processo de calibração, utilizou-se de algoritmo genético para determinar o melhor conjunto de parâmetros que representasse os dados empíricos. A calibração foi dividida em duas etapas. A primeira, descrita no item 7.1, tratou dos parâmetros de desempenho dos veículos pesados a fim de representar os caminhões típicos paulistas. Na segunda etapa, Araújo [2007], em pesquisa de doutorado paralela a esta de mestrado, ajustou os parâmetros da lógica de *car-following* que refletem o comportamento dos motoristas no tráfego, sintetizada no item 7.2.

7.1. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DOS CAMINHÕES

Pesquisas anteriores sobre o processo de calibração do CORSIM preocuparam-se

apenas em ajustar os parâmetros da lógica de *car-following* [Payne *et al.*, 1997; Cheu *et al.*, 1998; Chundury e Wolshon, 2000; Rakha e Crowther, 2003], visto que esta é uma parte crítica do modelo. Entretanto, Schultz e Rillet [2004] ressaltam que o uso dos parâmetros *default* do desempenho veicular nas simulações pode afetar a qualidade dos resultados da simulação em locais onde exista alta concentração de caminhões.

O escopo desta etapa foi complementar a calibração para representar os caminhões típicos observados em rodovias paulistas e suprir a ausência de trabalhos sobre ajuste dos parâmetros de desempenho veicular do CORSIM.

Conforme apresentado no Capítulo 4, a lógica de desempenho veicular do CORSIM é baseada em acelerações máximas para intervalos predefinidos de velocidades; por conseguinte, esta calibração visou ajustar os parâmetros de acelerações dos veículos pesados a partir de curvas de desempenho dos caminhões observados em rodovias de pista dupla do estado de São Paulo.

7.1.1. Curvas de desempenho veicular

O desempenho dos caminhões tem sido estudado desde a década de 1940. Saal [1941] determinou a velocidade de equilíbrio em rampas e Taragin [1945] avaliou o efeito do comprimento, da declividade e do peso dos veículos na desaceleração veicular em rampas. No Brasil, Silveira [1974] foi o pioneiro a obter curvas de desempenho da frota de caminhões nacionais. O Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) também fez estudos em diversas rodovias no Brasil que resultaram em curvas de velocidades de caminhões para análise de capacidade [DNER, 1977] e análise da necessidade de implantação de faixas adicionais [DNER, 1979].

O desempenho dos veículos em rampas é expresso por curvas de velocidade *versus* distância percorrida que caracterizam a aceleração/desaceleração do veículo. Essas curvas podem ser obtidas empírica ou analiticamente; estudos recentes usam uma combinação desses

métodos, de forma tal que o modelo analítico gera curvas de velocidade teóricas que são calibradas e validadas por curvas obtidas em campo por métodos empíricos [Demarchi, 2000; Melo, 2002].

As curvas empíricas são obtidas pelo monitoramento da velocidade de caminhões, selecionados aleatoriamente na corrente de tráfego ou usados exclusivamente para o teste, trafegando em rampas de diferentes inclinações e comprimentos. A velocidade pode ser obtida de diversas formas. Nos primeiros estudos, usava-se um automóvel que seguia o caminhão de forma constante; anotava-se a velocidade do veículo observado, a partir da velocidade do automóvel, em intervalos de distâncias pré-definidos [Wiley, 1949], ou nos instantes em que ocorrem trocas de marcha [Schwender *et al.*, 1957]. Hutton [1970] utilizou um equipamento composto por roda de bicicleta, hodômetro, velocímetro e cronômetro acoplado à traseira do caminhão de teste para obter as velocidades diretamente. A velocidade também pode ser calculada a partir de dados de distância e tempo obtidos por câmeras de vídeo instaladas ao longo da rodovia [Archilla e de Cieza, 1996] ou por dados reais da posição do veículo em intervalos constantes de tempo, obtidos com aparelho GPS (*Global Position System*) instalados no próprio caminhão [Melo, 2002]. Curvas empíricas de desempenho, entretanto, representam apenas os caminhões observados; para se obter um conjunto representativo de curvas da frota é preciso coletar grande quantidade de dados, o que nem sempre é viável.

As curvas analíticas de desempenho são obtidas através de modelos matemáticos baseados na segunda Lei de Newton, a qual estabelece que a resultante das forças aplicada em um corpo é igual ao produto da sua massa pela aceleração adquirida. O modelo mais simplificado considera a aceleração como função linear da velocidade para determinar a resultante das forças [Fancher, 1983; Bester, 2000]. A função linear simplifica a calibração, pois o modelo é descrito por apenas dois parâmetros (α e β). Bester [2000] também verificou

que esse modelo é representativo tanto para um único caminhão como para uma categoria de caminhões. Huff e Scrivner [1955] utilizaram um modelo linear um pouco mais sofisticado, que incluía funções lineares para cada intervalo de velocidade.

Os modelos mais complexos calculam as forças que atuam no veículo separadamente, nos quais a força motriz é função da potência do motor e a resistência ao movimento é função da velocidade e de coeficientes empiricamente obtidos [Demarchi, 2000]. Normalmente, a potência utilizada é suposta constante; estudos recentes buscaram avaliar o efeito de diversos parâmetros no resultado desses modelos, tais como: mudança de marcha [Rakha *et al.*, 2001], potência variável [Rakha e Lucic, 2002], condições do pavimento [Rakha e Yu, 2004] e do pneu [Rakha e Yu, 2005].

Tanto o HCM [TRB, 2000] como o *Green Book* da AASHTO [1990] fornecem curvas de desempenho para caminhões típicos americanos em diversos greides. No entanto, esses manuais ressaltam que, para aplicação em outros países, estas curvas devem ser ajustadas para serem representativas dos caminhões típicos da região [TRB, 2000]. No Brasil, Demarchi [2000] desenvolveu um modelo analítico calibrado para determinar curvas de desaceleração, com o qual Demarchi e Pierin [2001] modelaram o desempenho de caminhões canavieiros carregados e sobrecarregados no estado de São Paulo. Esse mesmo modelo foi validado por Demarchi *et al.* [2001] a partir de curvas empíricas obtidas em rodovias paulistas por Melo [2002].

Nesta pesquisa, as curvas de desempenho foram calibradas pela combinação de ambos os métodos. O modelo de simulação CORSIM gerou curvas analíticas para quatro categorias de caminhões que foram comparadas às curvas empíricas obtidas com aparelhos de GPS.

7.1.1.1. Coleta de dados

As curvas empíricas foram obtidas em rodovias paulistas com aparelho GPS diferencial. Os dados das categorias leves, médios e pesados foram coletadas em um estudo anterior

realizado por Melo [2002] na rodovia Washington Luiz (SP-310). Para os caminhões da categoria extrapesados foram realizadas coletas adicionais também na SP-310, partindo da balança localizada no km 201, sentido Norte. Nesta coleta, o GPS era instalado no caminhão extrapesado e percorrido um trecho da SP-310 com cerca de 10 km e rampas de vários greides e comprimentos. Como os caminhões partiam de uma balança, os dados do peso e potência de cada veículo monitorado eram conhecidos e permitiam determinar a relação massa/potência.

Durante o percurso, o GPS forneceu a posição do caminhão nos planos x , y e z em intervalos de um segundo. A partir desses dados, pôde-se obter tanto o perfil vertical da rodovia como a velocidade instantânea do caminhão. A Tabela 7.1 apresenta a amostra total de caminhões divididos por greide e por categoria, com a respectiva relação massa/potência média.

Tabela 7.1: Amostra total de caminhões obtidos com GPS divididos por rampa e por categoria

RAMPA	CATEGORIA			
	Leves (85 kg/kW)	Médios (166 kg/kW)	Pesados (163 kg/kW)	Extrapesados (207 kg/kW)
1%	1	11	9	0
2%	4	7	14	9
3%	2	11	9	8
4%	0	0	0	5
5%	1	6	5	0
TOTAL	8	35	37	22

Um aspecto importante na obtenção das curvas empíricas é que a amostra obtida (Tabela 7.1) deve representar a população de caminhões típicos. Para garantir isso, a relação massa/potência de cada caminhão desta amostra foi comparada com a amostra das categorias típicas apresentadas no Capítulo 6. Por isso, alguns caminhões da amostra (médios e pesados) foram eliminados para que a relação massa/potência dos caminhões observados com GPS estivesse entre o 50^o e o 85^o percentil da distribuição da relação massa/potência observada em balanças. Nas demais categorias todas as observações foram consideradas, na categoria leve devido à quantidade da amostra e na categoria extrapesada dada à pequena variação da relação massa/potência. A Tabela 7.2 resume a amostra usada na calibração e a Figura 7.1

ilustra a comparação entre as amostras.

Tabela 7.2: Amostra de caminhões usada na calibração

RAMPA	CATEGORIA			
	Leves (85 kg/kW)	Médios (168 kg/kW)	Pesados (167 kg/kW)	Extrapesados (207 kg/kW)
1%	1	9	9	0
2%	4	2	13	9
3%	2	7	9	8
4%	0	0	0	5
5%	1	5	5	0
TOTAL	8	23	36	22

Figura 7.1: Comparação da relação massa/potência dos dados coletados com GPS com a distribuição dos dados coletados em balança (Capítulo 6)

7.1.2. Algoritmo Genético

O algoritmo genético (AG) é uma ferramenta de otimização que utiliza técnicas de computação evolutiva em que os indivíduos de uma população tentam sobreviver em seu ambiente. O AG é considerado robusto por desenvolver buscas de soluções em múltiplos pontos ao invés de iniciar a busca a partir de um único ponto, como ocorre em ferramentas de otimização tradicionais, aumentando a chance de obter um ótimo global ao invés de um ótimo local. Essa habilidade de efetuar buscas múltiplas é a chave mestra quando o espaço de soluções é grande, complexo e pouco compreendido, como ocorre com frequência em

problemas na área de transportes [Kim e Rillet, 2001; Henderson, 2004].

O AG é inspirado na genética e na evolução dos seres vivos. A sobrevivência é proporcional ao grau de adaptação ao ambiente (*fitness*), que é um ranking de uma função objetivo aplicada a cada indivíduo. Os indivíduos são codificados em *strings* que representam um conjunto de características, denominado cromossomo, e cada unidade do cromossomo (gene) representa um parâmetro de uma das características.

A Figura 7.2 apresenta o fluxograma resumido dos principais procedimentos do algoritmo genético implementado para este trabalho, desenvolvido em ambiente VBA (*Visual Basic for Application*) no Microsoft Excel.

Figura 7.2: Fluxograma do algoritmo genético implementado

Ao iniciar o programa, deve-se fornecer a quantidade de indivíduos n da população e o limite máximo de gerações desejado. Após uma análise de sensibilidade realizada na categoria de caminhões leves, foram definidos os valores de 40 indivíduos e 50 gerações para realizar a calibração. Cada indivíduo é formado por uma *string* composta pelos 12 valores de aceleração usados pelo CORSIM, correspondentes às velocidades de 0 a 110 ft/s (120 km/h).

A função objetivo usada foi minimizar o erro médio absoluto (*EMA*), que representa a média dos erros médios relativos (*EMR*), de forma tal que um indivíduo (conjunto de parâme-

tros de acelerações) seja capaz de representar todos os caminhões da sua categoria observados nas diversas rampas. Assim, um indivíduo da categoria leve deve ser capaz de representar os 8 caminhões observados, enquanto um indivíduo da categoria pesado deve representar todos os 36 observados, conforme a amostra obtida apresentada na Tabela 7.2.

Ao final de cada geração, o indivíduo com menor erro médio absoluto, ou seja, o mais adaptado ao ambiente é selecionado (*elitismo*). Esse indivíduo realiza uma troca das suas características (*crossover*) com outros indivíduos da população, cujos erros médios absolutos são menores que a média da geração (*seleção*). A cada geração, todo indivíduo tem probabilidade de sofrer *mutação*, uma alteração aleatória em um de seus genes. A taxa de mutação adotada foi de 30% [Egami *et al.*, 2004]. Os indivíduos menos adaptados (com erro maior que a média dos erros da geração) foram eliminados da população e substituídos por novos indivíduos com características geradas aleatoriamente (*predação*).

Os experimentos de simulação foram realizados adotando-se um trecho hipotético composto de três segmentos: dois segmentos planos com 2 km de extensão e um segmento intermediário com inclinação variável e 5 km de extensão (Figura 7.3).

Figura 7.3: Trecho hipotético utilizado na calibração

O primeiro segmento foi necessário para limitar a velocidade de entrada na rampa, visto que cada caminhão observado nela entrou com velocidade diferente. Para suprir esse problema, uma sub-rotina do algoritmo limitava a velocidade do caminhão no arquivo do primeiro trecho, de acordo com a velocidade observada em campo, para que curvas simulada e empírica iniciassem com a mesma velocidade.

O volume de tráfego adotado nas simulações foi de apenas 10 veíc/h para que não

houvesse interação entre os veículos, evitando a influência da lógica de *car-following* durante a calibração e focando apenas a lógica do desempenho veicular. O tempo de cada simulação foi de 30 minutos. A frota de veículos no tráfego foi 100% de caminhões de uma categoria, ou seja, cada categoria de caminhão foi calibrada separadamente.

7.1.2.1. Criação dos indivíduos da população

Definida a quantidade n de indivíduos na população inicial, o algoritmo gerou aleatoriamente valores de aceleração para velocidades de 0 a 110 ft/s (120 km/h) para os n indivíduos. De acordo com os valores *default* do CORSIM, a aceleração em função da velocidade obedece à função monotônica decrescente. Assim, supôs-se que os parâmetros gerados seguem esta mesma função. Outra restrição adotada foi limitar os valores das acelerações, tendo em vista que a aleatoriedade dos valores gerados ocasionou erros na simulação como, por exemplo, o caminhão não conseguir subir rampas muito inclinadas. A Figura 7.4 apresenta os limites máximos e mínimos adotados. Para a solução ser aceitável, as acelerações devem estar dentro desta faixa de valores.

Figura 7.4: Limites adotados para os valores de aceleração

7.1.2.2. Criação dos arquivos de simulação

Após a geração dos n indivíduos da população, foram montados os arquivos para a simulação no CORSIM. Cada arquivo corresponde a um indivíduo (conjunto de acelerações), o qual foi simulado tantas vezes necessário para representar o desempenho dos caminhões

observados em campo. Por exemplo, um indivíduo da categoria pesado foi simulado 36 vezes – o que corresponde à quantidade observada em campo (Tabela 7.2) – variando-se apenas a velocidade inicial observada na entrada da rampa e a magnitude do greide.

7.1.2.3. Simulação

Nesta fase, executou-se a simulação do arquivo TRF no simulador CORSIM. Após a simulação, foi gerado o arquivo binário TSD (*Time Step Data*), com informações dos veículos durante cada segundo da simulação.

7.1.2.4. Obtenção do perfil de velocidade simulado

O perfil de velocidades foi obtido através do arquivo TSD, como no trabalho de Dhulipala [2002]. Uma sub-rotina foi implementada para extrair os dados do arquivo TSD, apresentada em detalhes no Apêndice B. Essa sub-rotina localiza os dados do trecho em rampa e extrai os dados de velocidades dos veículos para montar o perfil simulado. O arquivo TSD forneceu velocidades e distâncias percorridas a cada segundo; entretanto, para compatibilidade com as curvas usadas por Melo [2002], as curvas foram construídas a partir de velocidades simuladas a cada 100 m.

7.1.2.5. Comparação entre os perfis de velocidade simulado e observado

Como um indivíduo (conjunto de acelerações) deve ser capaz de representar todos os caminhões observados na categoria, a cada caminhão simulado foi calculado o erro médio relativo (*EMR*). O *EMR* representa o erro médio entre a curva simulada e a curva empírica, calculado pela diferença relativa das velocidades a cada 100 m:

$$EMR_{j_k} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m \left| \frac{V_{sim}^i - V_{obs}^i}{V_{obs}^i} \right| \quad (7.1)$$

em que: EMR_{j_k} : erro médio relativo para o caminhão k do indivíduo j ;
 V_{sim}^i : velocidade simulada no ponto i da rampa para o caminhão k ;

V_{obs}^i : velocidade observada no ponto i para o caminhão k ; e
 m : quantidade de pontos na rampa, distanciados de 100 m.

7.1.2.6. Cálculo do erro médio absoluto (EMA)

Após a simulação de todos os caminhões da categoria para um mesmo indivíduo, foi calculado o erro médio absoluto (EMA_j) do indivíduo através da seguinte equação:

$$EMA_j = \sum_{k=1}^N \frac{EMR_{j_k}}{N_k} \quad (7.2)$$

em que: EMA_j : erro médio absoluto do indivíduo j ;
 EMR_{j_k} : erro médio relativo para o caminhão k do indivíduo j ; e
 N_k : quantidade de caminhões observados na categoria k (Tabela 7.2).

O EMA representa a média dos erros médios relativos e indica a confiabilidade do conjunto de parâmetros gerados pelo AG; quanto menor o seu valor, melhor será o conjunto de acelerações. O EMA foi a função *fitness* escolhida para esta calibração.

7.1.2.7. Critérios de parada

Os critérios de parada do algoritmo foram dois: EMA menor ou igual a 3% ou número máximo de gerações, especificado pelo usuário no início do programa. Para as quatro categorias calibradas, o critério de parada alcançado foi o máximo de gerações especificado (50 gerações).

7.1.3. Resultados obtidos

A comparação da eficácia do resultado obtido pelo AG foi feita a partir de outros dois conjuntos de acelerações: (1) os valores *default* do CORSIM e (2) as acelerações obtidas pelo modelo analítico calibrado por Demarchi *et al.* [2001]. Este último conjunto de acelerações foi obtido considerando-se, para cada categoria de caminhão, o valor do 85º percentil da relação massa/potência observado em balanças apresentada no Capítulo 6. A comparação entre os três conjuntos de acelerações foi realizada através do EMA calculado para as quatro categorias de caminhão, apresentada na Figura 7.5.

Figura 7.5: Erros médios absolutos (EMA) obtidos para cada categoria

Os resultados mostram que os valores *default* do CORSIM forneceram as maiores diferenças entre o desempenho observado e simulado. Os maiores erros com as acelerações *default* ocorreram nas categorias de caminhões leves (25,7%) e médios (21,0%). Pode-se notar uma sensível melhoria nas estimativas para três das quatro categorias de caminhões (leves, médios e extrapesados) e uma razoável melhoria para a categoria pesado, com os parâmetros obtidos pelo AG. Os EMAs encontrados com o AG variaram entre 3,8% e 6,6%, enquanto com os valores *default* do CORSIM os erros variaram de 6,8% a 25,7%. Deve-se ressaltar que as comparações foram feitas com dados brutos de velocidade, sem aplicação de um processo de suavização para reduzir o ruído nos dados empíricos. Os resultados mostram claramente a eficácia do processo proposto.

A Tabela 7.3 apresenta os valores das acelerações obtidos pelo AG para as quatro categorias de caminhões utilizadas. Essa tabela tem o formato do arquivo do desempenho veicular (RT173) com as categorias especificadas segundo o índice adotado pelo CORSIM: leves (3), médios (4), pesados (5) e extrapesados (6). A Figura 7.6 apresenta os valores das acelerações obtidas pelo AG dentro do limite adotado na calibração.

Tabela 7.3: Valores calibrados das acelerações dos caminhões observados (RT173)

Índice do veículo	Valores calibrados das acelerações (10^{-2} ft/s ²)											
	0 ft/s	10 ft/s	20 ft/s	30 ft/s	40 ft/s	50 ft/s	60 ft/s	70 ft/s	80 ft/s	90 ft/s	100 ft/s	110 ft/s
3	899	890	360	302	203	176	109	1	49	19	-91	-98
4	1426	339	172	65	51	30	30	36	36	7	4	-20
5	954	804	581	220	101	71	60	41	50	7	-10	-13
6	1311	200	153	52	43	40	37	16	7	5	-55	-66

Figura 7.6: Acelerações calibradas pelo AG dentro do limite adotado

Para maior detalhamento da representação dos parâmetros calibrados, a Figura 7.7 apresenta os erros médios relativos (*EMR*) – diferença média entre a curva simulada e a empírica – de cada categoria de caminhão obtidos com o CORSIM calibrado pelo AG.

Figura 7.7: Resultados dos erros médios relativos

Pode-se notar que os caminhões médios e pesados apresentaram as maiores variações

do *EMR* e alguns caminhões com erros superiores a 15%. Os maiores erros ocorreram em rampas com greide superior a 4% porque, durante o percurso nelas, ocorrem mais reduções de marcha o que ocasionam maiores oscilações da velocidade que o CORSIM é incapaz de reproduzir, devido ao seu modelo simplificado de desempenho.

Este fenômeno pode ser verificado na Figura 7.8 que compara, para três diferentes magnitudes de greide, a curva de desempenho observada e a curva simulada com os parâmetros calibrados. Note-se o quão próximo o CORSIM calibrado representou as curvas empíricas.

Figura 7.8: Comparação entre as curvas de desempenho empírica e obtida por simulação

7.2. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS MOTORISTAS

A segunda etapa da calibração do CORSIM foi realizada por Araújo [2007], em pesquisa de doutorado realizada paralelamente a esta de mestrado. Araújo calibrou os parâmetros das lógicas que regem o comportamento dos motoristas com o propósito de representá-los em condições observadas nas rodovias de pista dupla do estado de São Paulo. Para isso, foram realizadas coletas de dados em um trecho de 7,5 km na rodovia Washington Luiz (SP-310), localizado no entorno da cidade de São Carlos-SP. Nas coletas, seis pontos de controle

monitoraram os fluxos de tráfego e os tempos de viagens dos veículos, além da composição do tráfego e da matriz origem/destino, perfazendo total de cinco horas [Araújo, 2007].

O trecho em estudo foi codificado no CORSIM e os novos parâmetros do desempenho dos caminhões, calibrados nesta pesquisa (Tabela 7.3), foram usados nesta segunda etapa da calibração. Araújo [2007] usou um programa computacional, baseado no algoritmo genético de Kim e Rillet [2001], desenvolvido em *Perl*, para ajustar os melhores parâmetros. As medidas de desempenho utilizadas para avaliar a eficiência do modelo foram velocidade e fluxo de tráfego [Araújo, 2007].

Tabela 7.4: Parâmetros dos motoristas calibrados por Araújo [2007]

Parâmetro	Descrição	Valor Calibrado
P ₁	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 1	110
P ₂	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 2	121
P ₃	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 3	96
P ₄	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 4	104
P ₅	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 5	76
P ₆	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 6	82
P ₇	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 7	63
P ₈	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 8	42
P ₉	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 9	58
P ₁₀	Fator de sensibilidade para o <i>car-following</i> para os motoristas do tipo 10	45
P ₁₁	Constante de PITT para o <i>car-following</i>	3
P ₁₂	Tempo de reação para acelerar	8
P ₁₃	Tempo de reação para desacelerar	5
P ₁₄	Tempo para completar uma mudança de faixa	53
P ₁₅	Tempo mínimo para geração de veículos	15
P ₁₆	Aceitação de <i>gap</i> para mudança de faixa obrigatória	3
P ₁₇	Porcentagem de motoristas que cedem o direito de passagem para veículos mudando de faixa	15
P ₁₈	Multiplicador para o desejo de realizar uma mudança de faixa arbitrária	1
P ₁₉	Valor limite do benefício para realizar uma mudança de faixa arbitrária	0,4
P ₂₀	Desaceleração máxima do veículo líder percebida pelo seu seguidor	12

Foram calibrados todos os parâmetros contidos nos RT68, RT69 e RT70 do CORSIM (Tabela 7.4), com exceção dos relativos à máxima desaceleração emergencial, pois os valores *default* desses parâmetros foram considerados aceitáveis e não teriam influência significativa nos resultados das simulações [Araújo, 2007]. O erro médio obtido com o modelo calibrado foi de 6,32%, sendo que, com os valores *default* do CORSIM, o erro médio obtido na simulação foi de 9,11%. A calibração apresentou uma redução relativa de aproximadamente

30%. Os valores calibrados por Araújo [2007] estão descritos e apresentados na Tabela 7.4.

7.2.1. VALIDAÇÃO DO CORSIM

A validação envolve a aplicação do modelo de simulação calibrado para verificar se os resultados da representação de diferentes condições de tráfego são confiáveis [Araújo, 2007]. Para isso, Araújo [2007] validou o modelo com um conjunto de dados diferente da calibração. Uma nova coleta de dados foi realizada, monitorando-se oito seções do mesmo trecho da SP-310, totalizando três horas. O resultado da validação foi erro médio de 6,58%, comprovando que os parâmetros calibrados também produzem resultados válidos para um conjunto de dados com características diferentes do usado na calibração.

7.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a calibração do CORSIM para as condições observadas em rodovias paulistas de pista dupla. A primeira etapa da calibração focou nos parâmetros de desempenho dos caminhões, utilizando algoritmo genético (AG). Foram obtidos valores de acelerações de modo que o modelo representasse o comportamento dos caminhões observados, a partir de curvas de desempenho obtidas com aparelho GPS. A calibração foi satisfatória, pois os erros médios obtidos em simulações usando o conjunto de parâmetros calibrados foram da ordem de 5%, significativamente menores que os erros obtidos em simulações com os parâmetros *default*, que foram da ordem de 15%.

Na segunda etapa, Araújo [2007] usou os parâmetros do desempenho dos caminhões calibrados e ajustou os parâmetros do comportamento dos motoristas utilizando outro AG. Os erros médios obtidos foram de 6,32% na calibração e de 6,58% na validação, indicando que a calibração e a validação do CORSIM foram adequadas para os propósitos das pesquisas envolvidas. Assim, o modelo CORSIM está calibrado para as condições observadas em rodovias paulistas e o capítulo a seguir trata do cálculo dos equivalentes utilizando simulação.

8. CÁLCULO DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA

Este capítulo trata das duas últimas etapas do método proposto (cálculo dos equivalentes veiculares e análise dos resultados) para atingir a meta desta pesquisa: avaliar o uso de uma medida de impedância alternativa no cálculo de fatores de equivalência para caminhões em rodovias de pista dupla. Assim, são apresentados e discutidos os resultados dos fatores de equivalência obtidos a partir de simulação de tráfego usando uma versão do CORSIM calibrado e validado para as condições observadas em rodovias paulistas.

A primeira parte deste capítulo define algumas características adotadas para a realização das simulações, como a variabilidade e os cenários considerados. Na segunda parte, é descrito o método usado para obtenção das curvas fluxo-impedância e os limites dos níveis de serviço são definidos para o critério da medida de impedância estudada, a velocidade dos automóveis. Em seguida, são apresentados os fatores de equivalência obtidos usando tanto a velocidade como medida de impedância como, também, usando a densidade. Por fim, os resultados obtidos ao se estimar o nível de serviço utilizando-se os equivalentes determinados para cada uma das medidas estudadas são avaliados e comparados com os resultados de um estudo anterior [Demarchi, 2000] e com o método original do HCM-2000 [TRB, 2000].

8.1. CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES

As simulações necessárias para o cálculo dos fatores de equivalência foram realizadas com o modelo de simulação CORSIM calibrado para as condições observadas em rodovias paulistas de pista dupla (Capítulo 7). O item 8.1.1 discute e define alguns parâmetros do CORSIM que são usados para introduzir variabilidade nas simulações. No item 8.1.2 são descritos os cenários considerados e o trecho hipotético.

8.1.1. Variabilidade nas simulações

O CORSIM permite incorporar certo grau de variabilidade nas simulações definido por três aspectos: a variação da velocidade dos veículos, o processo de geração dos veículos e o conjunto de números pseudo-aleatórios.

A velocidade dos veículos está diretamente relacionada ao comportamento de cada motorista. Para condições de fluxo livre, a velocidade máxima em que o motorista conduz o veículo é dada pelo produto do fator de ajuste para a velocidade do motorista e da velocidade de fluxo livre (FFS – *free flow speed*) do tramo. Os fatores de ajuste para a velocidade são especificados para cada tipo de motorista no arquivo RT147, conforme apresentado no Capítulo 4. Entretanto, estes fatores não foram considerados na calibração do modelo (Capítulo 7), por não apresentarem influência significativa na análise de sensibilidade [Araújo, 2007]. Assim, optou-se por adotar os valores *default* do modelo, que variam de 88% da FFS (motorista menos agressivo) a 112% (motorista mais agressivo), como mostra a Tabela 4.3. Como pode ser percebido, os fatores da Tabela 8.1 permitem modificar a distribuição de velocidades desejadas dos veículos simulados.

Tabela 8.1: Variabilidade da velocidade de fluxo livre escolhida para cada motorista do CORSIM

Tipo de motorista	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Porcentagem da FFS	88	91	94	97	99	101	103	106	109	112

Outro importante aspecto a ser considerado nas simulações é o processo de geração dos veículos. Os dados de filmagens da rodovia Washington Luiz (SP-310), realizada por Araújo [2007], permitiram verificar que os *headways* observados entre veículos que entram no sistema apresentam aleatoriedade significativa. Como o CORSIM permite gerar veículos de forma estocástica, o processo de geração adotado nesta pesquisa foi baseado na distribuição exponencial negativa, por ser a que melhor representou as condições observadas em rodovias paulistas [Demarchi, 2000; Araújo, 2007].

Por fim, o CORSIM usa seqüências de números pseudo-aleatórios para criar o grau de aleatoriedade necessário na geração de veículos e na tomada de decisões. O uso de números pseudo-aleatórios para a geração de veículos permite variar cada *headway* de entrada, de acordo com a função de distribuição estocástica adotada, e modelar o processo de tomada de decisões em situações tais como aceitação de *gaps* e mudanças de faixa. O uso de uma mesma seqüência de números pseudo-aleatórios permite que o usuário replique simulações para comparações entre alternativas; por outro lado, a replicação das simulações, usando-se seqüências diferentes, reduz a variância nos resultados das simulações de tal forma que cada simulação seja estatisticamente independente [Banks e Carson, 1984]. O próprio manual do CORSIM [FHWA, 2001] recomenda a utilização de vários conjuntos diferentes de números pseudo-aleatórios para a simulação de um mesmo cenário, buscando melhor representação das condições do tráfego simulado. Dessa forma, esta pesquisa adotou dez seqüências de números pseudo-aleatórios diferentes para replicar cada cenário.

8.1.2. Cenários simulados

Os cenários considerados combinam diversas características do tráfego e da geometria do trecho hipotético, como: velocidade de fluxo livre (FFS), taxa de fluxo de tráfego, porcentagem de caminhões, comprimento de rampa e inclinação do greide. Cada alteração de uma dessas características representou um novo arquivo simulado. A seguir, são detalhadas as características adotadas para o tráfego, a geometria da via e o tempo de simulação.

8.1.2.1. Características do tráfego

As características do tráfego consideradas foram velocidade de fluxo livre (FFS), fluxo de tráfego e porcentagem total de caminhões no tráfego, descritas a seguir.

Nesta pesquisa, foram consideradas duas velocidades de fluxo livre: 100 km/h e 110 km/h. A primeira é próxima da usada por Demarchi [2000] (102 km/h), enquanto a FFS

de 110 km/h representa o limite da velocidade atual na maioria das rodovias paulistas de pista dupla.

As taxas de fluxos de tráfego foram determinadas em função da geração das curvas básica (com tráfego apenas de automóveis) e mista (automóveis e caminhões), de modo a representar todo o regime de fluxo livre até a capacidade da rodovia. Assim, foram definidas treze taxas de fluxo de tráfego para simulação, apresentadas na Tabela 8.2.

Tabela 8.2: Cenários considerados

<i>Tráfego</i>			<i>Geometria da Rampa</i>		<i>Sementes para geração de números pseudo-aleatórios</i>	
<i>FFS [km/h]</i>	<i>Taxa de fluxo [veic/h]</i>	<i>% de caminhões</i>	<i>Greide [%]</i>	<i>Comprimento [m]</i>	<i>Geração de veículos</i>	<i>Tomada de decisões</i>
110	500	0	0	500	22.321.167	72.564.643
100	1.000	10	2	1.250	36.930.463	16.805.073
	1.400	20	4	2.000	85.004.683	942.629
	2.000	30	6		23.995.653	16.966.139
	2.100	40	8		32.582.197	23.500.659
	2.200	50			67.755.629	3.682.867
	2.500				42.031.469	78.383.393
	2.900				43.648.641	21.978.429
	3.100				7.750.487	16.278.491
	3.200				41.135.427	66.084.279
	4.050					
	4.400					
	5.000					

As porcentagens totais de caminhões no tráfego simulado variaram de 0% até 50%, como mostra a Tabela 8.2. As porcentagens escolhidas representam valores típicos observados na caracterização do tráfego de rodovias paulistas, descrita no Capítulo 5. A composição típica do tráfego de caminhões adotada nas simulações é apresentada na Tabela 8.3 e foi estabelecida de acordo com a caracterização do Capítulo 6, visto que o método de cálculo do equivalente veicular deve considerar uma composição fixa de caminhões [Demarchi e Setti, 2003].

Tabela 8.3: Composição de caminhões simulada (definida no Capítulo 6)

<i>Categoria</i>	<i>Porcentagem (p_i)</i>
Leve	30%
Médios	33%
Pesados	33%
Extrapesados	4%

8.1.2.2. Geometria do trecho

O trecho hipotético de rodovia usado nas simulações foi constituído por três segmentos retos com duas faixas de tráfego, conforme ilustra a Figura 7.3. Buscou-se representar uma composição de greides, que é característica muito comum nos perfis verticais em rodovias paulistas. O fator de equivalência veicular foi calculado para o trecho em aclive. Os valores adotados para a magnitude do greide (0 a 8%) e o comprimento de rampa (500 m, 1.250 m e 2.000 m) foram os mesmos da pesquisa anterior [Demarchi, 2000].

Figura 8.1: Croqui do trecho hipotético utilizado na simulação

8.1.2.3. Tempo de simulação

O tempo total adotado para as simulações foi de 3 horas, sendo que nos últimos 15 minutos foi gerado um incidente (bloqueio de uma faixa de tráfego) no terceiro tramo, com o propósito de reduzir a capacidade do tramo intermediário o que, por sua vez, aumenta a quantidade de pontos na região congestionada da relação fluxo-impedância.

Uma vantagem do CORSIM em relação a outros simuladores é que, ao se estabelecer o tempo total de simulação, não é preciso incluir um tempo extra para carregamento da rede (*warm up*). O tempo de *warm up* é especificado no arquivo RT02 (*Run control*) no campo 4, denominado *maximum initialization prior to simulation*. Antes de iniciar uma simulação, como a rede não contém veículos, o modelo carrega a rede até atingir o equilíbrio sem exceder o tempo de *warm up* especificado. Ao atingir-se o equilíbrio, tem início a simulação;

caso se exceda o tempo de *warm up* sem que um equilíbrio seja atingido, a simulação pára. O tempo máximo de *warm up* adotado nas simulações foi de 15 minutos.

Os cenários simulados combinam as características do tráfego e da geometria da via, apresentadas na Tabela 8.2. As duas últimas colunas da Tabela 8.2 apresentam os dez pares de sementes de seqüências de números pseudo-aleatórios utilizados para a replicação de cada cenário.

A combinação de todas as características da Tabela 8.2 resultou em 23.400 simulações, totalizando 70.200 horas de tráfego simulado. Estas simulações despenderam mais de 1.100 horas de processamento divididas em três computadores: um Pentium IV 3.0 Ghz, um AMD Sempron 3000 e um Pentium IV 2.8 Ghz. Cada computador, em média, processou simulações ininterruptamente durante 12 dias. Para isso, foi implementado um programa em VBA, no Excel, que acionava o CORSIM automaticamente para simular o conjunto de cenários. Este programa era capaz de gerar o arquivo de simulação TRF com as características de cada cenário, simular este arquivo TRF no CORSIM e extrair os dados do arquivo TSD produzido na simulação de cada cenário. O Apêndice B descreve o código utilizado para extrair os dados do arquivo binário TSD produzido pelo CORSIM.

8.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os valores das variáveis de tráfego foram extraídos dos resultados das simulações a intervalos de 5 minutos, para garantir um adequado grau de variabilidade. Como cada simulação representava 3 horas de tráfego, para cada cenário foram obtidas 36 observações das variáveis de tráfego descritas a seguir.

8.2.1. Cálculo das variáveis de tráfego

As variáveis de tráfego obtidas das simulações foram fluxo de tráfego, velocidade da corrente de tráfego, velocidade dos automóveis e densidade. O fluxo de tráfego médio q (em

veíc/h.faixa) no tramo intermediário foi determinado por:

$$q = \frac{3600}{N} \cdot \frac{(n_i - n_{i-1})}{\Delta t} \quad (8.1)$$

em que: n_i, n_{i-1} : número acumulado de veículos que passaram pelo tramo desde o início da simulação ($i = 0$) até os intervalos i e $i-1$;

Δt : intervalo de tempo entre os intervalos i e $i-1$ ($\Delta t = 300$ s); e

N : número de faixas de tráfego ($N = 2$).

A velocidade média da corrente de tráfego u (em km/h) no tramo foi calculada por:

$$u = 3600 \cdot L \cdot \frac{(n_i - n_{i-1})}{(tv_i - tv_{i-1})} \quad (8.2)$$

sendo: tv_i, tv_{i-1} : soma dos tempos de viagem (em segundos) de todos os veículos que passaram pelo tramo desde o início da simulação ($i = 0$) até os intervalos de tempo i e $i-1$; e

L : comprimento do tramo (km).

A velocidade média dos automóveis u_a (em km/h) no tramo foi determinada por:

$$u_a = 3600 \cdot L \cdot \frac{(n'_i - n'_{i-1})}{(tv'_i - tv'_{i-1})} \quad (8.3)$$

em que: n'_i, n'_{i-1} : número acumulado de automóveis que passaram pelo tramo desde o início da simulação ($i = 0$) até os intervalos i e $i-1$; e

tv'_i, tv'_{i-1} : soma dos tempos de viagem (em segundos) de todos os automóveis que passaram pelo tramo desde o início da simulação ($i = 0$) até os intervalos de tempo i e $i-1$.

A densidade k (veíc/km.faixa) foi obtida a partir da relação fundamental de tráfego:

$$k = \frac{q}{u} \quad (8.4)$$

8.2.2. Geração das curvas fluxo-impedância

As curvas fluxo-impedância foram geradas para os diversos cenários apresentados na Tabela 8.2. A combinação de duas medidas de desempenho (velocidade dos automóveis e densidade), duas velocidades de fluxo livre, seis porcentagens de caminhões, cinco magnitu-

des de greide e três comprimentos de rampa resultou 360 curvas fluxo-impedância diferentes.

Cada curva gerada contém 4.680 pontos fluxo-impedância que correspondem às treze taxas de fluxo de tráfego simuladas (Tabela 8.2), replicadas dez vezes. Cabe lembrar que cada taxa de fluxo simulada gerou 36 pontos de variáveis de tráfego. A Figura 8.2 ilustra os pontos gerados para a curva básica (0% de greide e 0% de caminhões) com FFS de 110 km/h e rampa de 500 m, enquanto a Figura 8.3 ilustra os pontos para um aclave i de 4%, porcentagem de caminhões p de 30%, FFS de 110 km/h e comprimento de rampa L de 500 m.

A partir dos pontos gerados, foi necessário determinar uma curva ajustada que melhor representasse os resultados das simulações. Segundo Rakha e Crowther [2003], o modelo microscópico do CORSIM é caracterizado pelo modelo macroscópico de Pipes, que utiliza apenas três parâmetros para seu ajuste: velocidade de fluxo livre (u_f), capacidade da via (q_c) e densidade de congestionamento (k_j). Para o regime congestionado, este modelo explica bem os resultados simulados. Porém, para o regime de fluxo livre, o modelo de Pipes considera a velocidade de fluxo livre a mesma para a velocidade na capacidade. Esta situação não foi observada nos resultados obtidos nas simulações, principalmente em situações com maiores inclinações de greide e porcentagem de caminhões – como a apresentada na Figura 8.3(a). Assim, optou-se por um ajuste utilizando uma curva média que passa pelos pontos obtidos.

(a) Curva básica fluxo-velocidade dos automóveis

(b) Curva básica fluxo-densidade

Figura 8.2: Ajuste da curva básica com FFS = 110 km/h, $L = 500$ m, $i = 0\%$ e $p = 0\%$

Figura 8.3: Ajuste da curva com FFS = 110 km/h, $L = 500$ m, $i = 4\%$ e $p = 30\%$

A curva média foi definida apenas para o regime de fluxo livre até a capacidade da rodovia, definida pela densidade na capacidade (k_m) em 25 veic/(km.faixa) – máximo valor determinado nas curvas básicas, como mostra a Figura 8.2(b). Os pontos com densidade maior que k_m foram desprezados na curva ajustada. Em seguida, determinou-se a média dos pontos a cada intervalo de fluxo de tráfego de 50 veic/(h.faixa), resultando nas curvas ajustadas, que também estão mostradas na Figura 8.2 e na Figura 8.3. Ao traçar a curva média, quando necessário, alguns pontos foram ajustados visualmente.

8.3. DETERMINAÇÃO DO EQUIVALENTE VEICULAR

Determinadas as curvas fluxo-impedância, o fator de equivalência foi calculado pelo método do equivalente médio proposto por Demarchi e Setti [2003]. O método consiste em determinar o E_T , para uma composição típica de caminhões, a partir do fluxo básico q_b e do fluxo misto q_m para um mesmo valor da medida de impedância, através da expressão:

$$E_T = \frac{1}{p} \cdot \left[\frac{q_b}{q_m} - 1 \right] + 1 \quad (8.5)$$

em que:

- p : porcentagem total de caminhões na corrente de tráfego;
- q_b : fluxo de tráfego na corrente básica, em cpe/h.faixa; e
- q_m : fluxo de tráfego na corrente mista, em veic/h.faixa.

Tal como feito por Demarchi [2000], optou-se por determinar os valores dos fatores de

equivalência para os fluxos correspondentes aos limites dos níveis de serviço A, B, C, D e E, os fluxos de serviço para cada nível de serviço.

8.3.1. Definição dos limites dos níveis de serviço

Como a medida de impedância alternativa avaliada nesta pesquisa é a velocidade dos automóveis, os limites dos níveis de serviço (NS) foram definidos para este critério.

Historicamente, a velocidade dos automóveis foi usada, inicialmente, como critério principal para definição de nível de serviço em rodovias de pista dupla na segunda edição do HCM, em 1965, pois foi considerada a medida diretamente percebida pelos motoristas para descrever a qualidade experimentada nas rodovias [Roess, 1984]. Roess *et al.* [1979] sugeriram que o nível de serviço em rodovias de pista dupla fosse definido pela velocidade e pela densidade, sendo a densidade a medida principal. A partir da terceira edição do HCM (1985), o nível de serviço foi definido em função da densidade como critério principal, porém valores de velocidades dos automóveis também são apresentados como derivada da densidade e do fluxo de tráfego [TRB, 1985, 1994, 2000]. A Tabela 8.4 apresenta as velocidades dos automóveis – derivada da densidade – em três edições do HCM.

Tabela 8.4: Limites dos níveis de serviço para a velocidade dos automóveis em três versões do HCM

FFS	Edição do HCM	Velocidade dos automóveis (km/h)				
		NS A	NS B	NS C	NS D	NS E
110 km/h	1985	106	101	97	84	58
	1994	110	110	107	101	83
	2000	110	110	107	99	95
100 km/h	1985	96	91	87	74	48
	1994	100	100	99	95	79
	2000	100	100	98	91	88

Para determinar as velocidades dos automóveis da Tabela 8.4 foi preciso definir os níveis de serviço pelo critério da densidade. O HCM-2000 [TRB, 2000] sugere para definição do nível de serviço em rodovias americanas de pista dupla as densidades apresentadas na Tabela 8.5.

Tabela 8.5: Critério para definição dos níveis de serviço em rodovias de pista dupla [TRB, 2000]

Nível de Serviço	Densidade (cpe/km.faixa)
A	$k \leq 7$
B	$7 < k \leq 11$
C	$11 < k \leq 16$
D	$16 < k \leq 22$
E	$22 < k \leq 28$

Demarchi [2000] definiu níveis de serviço para rodovias paulistas seguindo os valores de densidades apresentados no HCM de 1997 [TRB, 1997]. Como o HCM-2000 apresenta valores de densidades diferentes dos usados por Demarchi [2000], a Tabela 8.6 compara as densidades adotadas no estudo de Demarchi [2000] e as apresentadas no HCM-2000.

Tabela 8.6: Limites dos níveis de serviço para o critério da densidade

Nível de Serviço	Densidade máxima (cpe/km.faixa)	
	<i>Demarchi [2000]</i>	<i>HCM-2000</i>
A	6	7
B	10	11
C	15	16
D	20	22
E	28	28

Para esta pesquisa, os níveis de serviço A, B, C e D foram definidos pelas densidades de 6, 10, 15 e 20 cpe/km.faixa, respectivamente, conforme os valores adotados no estudo anterior [Demarchi, 2000]. Para o nível de serviço E, foi adotado o valor de 25 cpe/km.faixa que corresponde à densidade na capacidade obtida na curva básica (apenas automóveis) – ilustrada na Figura 8.2(b), uma vez que não se observaram valores superiores nas simulações realizadas. A partir destas densidades, foi possível estimar os fluxos de tráfego na curva básica fluxo-densidade – Figura 8.2(b) – e, conseqüentemente, a partir dos valores dos fluxos obtidos, as velocidades dos automóveis para cada nível de serviço foram determinadas nas curvas básicas fluxo-velocidade dos automóveis – Figura 8.2(a).

A Tabela 8.7 resume os critérios adotados nesta pesquisa para os níveis de serviço em rodovias de pista dupla do estado de São Paulo. São apresentados os valores adotados para a densidade (medida principal), os valores obtidos para a velocidade dos automóveis (variável

investigada nesta pesquisa) e o fluxo de serviço obtido para cada nível de serviço.

Tabela 8.7: Critérios dos níveis de serviço adotados para rodovias paulistas de pista dupla

FFS	Critério	Nível de Serviço (NS)				
		A	B	C	D	E
110 km/h	Máxima densidade (cpe/km.faixa)	6	10	15	20	25
	Velocidade dos automóveis (km/h)	108	106	103	97	84
	Máxima taxa de fluxo (cpe/h.faixa)	650	1.065	1.545	1.930	2.100
100 km/h	Máxima densidade (cpe/km.faixa)	6	10	15	20	25
	Velocidade dos automóveis (km/h)	97	96	93	90	80
	Máxima taxa de fluxo (cpe/h.faixa)	580	960	1.400	1.800	2.000

Os critérios adotados na Tabela 8.7 resultaram em curvas básicas para as rodovias paulistas de pista dupla que podem substituir as apresentadas no HCM-2000, determinadas para rodovias americanas. A Figura 8.4 mostra as curvas básicas obtidas por simulação para as velocidades de fluxo livre (FFS) de 110 km/h e 100 km/h, usando a velocidade dos automóveis como medida de impedância para caracterizar o nível de serviço.

Figura 8.4: Curvas básicas fluxo-velocidade obtidas para rodovias paulistas de pista dupla

O formato das curvas básicas da Figura 8.4 é semelhante ao das curvas apresentadas na edição de 1985 do HCM [TRB, 1985], devido à sensível redução da velocidade dos automóveis ao aumento do fluxo. As curvas da Figura 8.4, entretanto, diferem das apresentadas no HCM-2000 que, para fluxos de até 1.400 cpe/h.faixa, consideram constante a velocidade dos automóveis nos níveis de serviço A e B, como apresentado na Tabela 8.4.

Uma vez definidos os níveis de serviço para a medida de desempenho investigada e, conseqüentemente, os fluxos de serviço correspondentes, foi possível calcular os fatores de

equivalências para caminhões de acordo com a Equação 8.5. Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos em relação aos equivalentes veiculares calculados para diferentes magnitudes de greide, comprimentos de rampa, porcentagens de caminhões e níveis de serviço.

8.3.2. Equivalentes veiculares baseados na velocidade média dos automóveis

A Tabela 8.8 apresenta os fatores de equivalência para rodovias de pista dupla com duas faixas de tráfego por sentido e FFS de 110 km/h, determinados pela Equação 8.5, considerando a velocidade dos automóveis como medida de impedância.

Tabela 8.8: Equivalentes veiculares para caminhões típicos baseados na velocidade dos automóveis, para FFS = 110 km/h

Greides - inclinação e comprimento (km)																
	% de cam.	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	10	1,0	1,2	1,5	1,8	2,7	6,1	3,6	12,2	41,4	7,8	63,2	153,5	52,3	223,1	333,1
	20	1,2	1,3	1,5	1,8	2,8	4,3	3,0	12,3	41,8	5,8	53,0	121,0	29,5	143,7	199,
	30	1,4	1,5	1,9	1,9	3,2	4,1	2,8	11,8	38,5	4,9	49,3	91,9	22,9	111,7	152,4
	40	1,5	1,5	1,8	1,9	3,3	4,0	2,8	11,8	39,1	4,3	46,3	79,8	18,3	100,1	123,5
	50	1,5	1,6	1,8	1,9	3,3	3,8	2,7	11,0	32,3	4,1	42,3	67,4	16,3	85,7	107,3
NS B	10	1,7	2,0	2,6	2,6	4,8	6,3	4,5	14,6	29,3	8,2	41,5	104,3	33,6	154,8	222,5
	20	1,9	2,3	2,5	2,6	4,7	5,7	4,0	11,1	27,7	5,9	35,7	84,8	19,4	100,4	136,1
	30	2,0	2,2	2,5	2,6	4,3	5,6	3,5	9,5	26,3	5,2	33,5	63,4	15,2	78,3	102,1
	40	2,1	2,3	2,6	2,5	4,1	5,5	3,3	9,1	26,5	4,8	32,2	55,1	12,3	66,8	87,3
	50	2,0	2,4	2,7	2,5	4,0	5,2	3,1	8,2	22,4	4,6	29,0	47,4	11,0	58,2	72,4
NS C	10	2,7	3,5	3,7	3,7	6,4	8,6	5,2	14,5	30,6	8,4	38,1	85,2	19,9	126,5	184,1
	20	2,7	3,4	3,6	3,3	5,7	6,9	4,7	12,1	23,8	6,5	28,9	69,6	13,5	82,8	113,0
	30	2,6	3,4	3,6	3,3	5,6	6,6	4,3	10,0	23,3	6,0	27,4	52,5	10,9	65,4	85,0
	40	2,6	3,4	3,6	3,3	5,1	6,3	4,0	8,9	21,9	5,3	26,5	45,0	9,8	55,3	72,8
	50	2,6	3,3	3,6	3,2	4,9	6,0	3,8	9,0	18,4	4,9	23,9	39,7	9,0	50,5	64,7
NS D	10	3,2	4,0	4,2	4,1	6,9	9,9	5,6	12,4	23,1	7,8	28,1	57,8	14,6	64,7	135,0
	20	3,3	3,8	4,2	3,8	6,0	7,4	4,7	10,8	18,0	6,2	20,7	52,8	10,3	47,9	80,6
	30	3,1	3,7	4,1	3,6	5,7	6,6	4,4	8,6	15,2	5,9	19,1	38,4	8,5	41,7	53,6
	40	2,9	3,6	3,8	3,6	5,3	6,3	4,2	7,9	15,9	5,3	17,1	31,5	7,7	38,4	47,7
	50	2,8	3,7	3,6	3,5	5,2	5,8	3,9	7,6	13,5	5,0	15,8	31,2	7,0	34,7	41,4
NS E	10	2,9	3,8	4,4	3,5	5,0	7,8	3,8	8,0	15,2	5,4	17,6	32,7	6,4	34,8	60,3
	20	2,7	3,2	4,3	3,0	4,5	5,7	3,6	8,1	11,9	4,7	13,2	29,0	5,5	27,8	44,8
	30	2,7	3,2	4,2	3,0	4,3	5,5	3,5	6,3	10,8	4,7	11,4	20,5	5,5	26,8	32,3
	40	2,6	3,2	3,9	3,0	4,3	5,1	3,5	6,0	9,5	4,5	11,0	17,4	5,5	22,4	27,8
	50	2,7	3,2	3,4	2,9	4,1	4,4	3,5	5,9	9,7	4,3	11,4	16,1	4,8	20,2	23,6

Elefteriadou *et al.* [1997] afirmam que os fatores de equivalência baseados na velocidade aumentam com o fluxo de tráfego, comprimento de rampa, magnitude do greide. Linzer

et al. [1979], por sua vez, verificam que os fatores decrescem com o aumento da porcentagem de caminhões. De modo geral, as observações de ambos os autores foram confirmadas nesta investigação, como mostram os resultados da Tabela 8.8. Como exemplo, a Figura 8.5 e a Figura 8.6, elaboradas para o nível de serviço C (103 km/h), corroboram a conclusão de que os fatores de equivalência aumentam com o comprimento da rampa e a magnitude do greide, respectivamente.

Figura 8.5: Variação do fator de equivalência em função do comprimento da rampa para o nível de serviço C (103 km/h)

Figura 8.6: Variação do fator de equivalência em função da magnitude do greide para o nível de serviço C (103 km/h)

A Figura 8.7, elaborada para rampa de 1,25 km, mostra que os equivalentes diminuem com o aumento da porcentagem de caminhões, pois, conforme o HCM-2000, os maiores valores de equivalentes veiculares ocorrem quando há poucos veículos pesados na corrente de tráfego.

Figura 8.7: Variação do fator de equivalência em função da porcentagem de caminhões, para rampa de 1,25 km

Huber [1982] demonstrou que, se a velocidade da corrente de tráfego for usada como medida de desempenho, os valores dos equivalentes são máximos e diminuem com o aumento do fluxo de tráfego; ao se usar a velocidade dos automóveis, os valores dos fatores de equivalência são constantes e não variam com porcentagem de caminhões e fluxo de tráfego. A Figura 8.8 mostra o efeito do fluxo de tráfego no valor do equivalente veicular, elaborada para rampa de 1,25 km de extensão.

Figura 8.8: Variação do fator de equivalência em função do fluxo de tráfego, para rampa de 1,25 km

Observa-se na Figura 8.8 que, ao contrário do que Huber [1982] demonstrou, os equivalentes veiculares obtidos usando-se a velocidade dos automóveis como medida de desempenho variam em função da porcentagem de caminhões e do fluxo de tráfego. Nas rampas mais acentuadas (4%, 6% e 8%), os valores dos equivalentes baseados na velocidade dos automóveis são máximos para baixos fluxos de tráfego e decrescem com o aumento do fluxo.

A Tabela 8.9 apresenta os fatores de equivalência para rodovias de pista dupla com duas faixas de tráfego por sentido e FFS de 100 km/h.

Tabela 8.9: Equivalentes veiculares para caminhões típicos baseados na velocidade dos automóveis, para FFS = 100 km/h

<i>Greides - inclinação e comprimento (km)</i>																
	% de cam.	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	10	1,7	2,4	2,6	2,3	4,5	6,3	4,0	11,5	35,6	5,9	34,3	65,4	23,8	91,0	104,7
	20	1,6	1,8	2,0	2,1	2,9	3,7	2,9	7,3	21,7	4,6	27,2	46,0	13,3	57,7	68,5
	30	1,4	1,7	1,7	2,0	2,9	3,5	2,5	7,3	20,1	4,0	24,9	36,3	11,0	47,2	52,9
	40	1,3	1,6	1,6	1,8	2,9	3,4	2,4	7,1	16,4	3,6	22,3	30,7	11,0	38,8	43,8
	50	1,3	1,5	1,6	1,7	2,6	3,1	2,6	6,9	15,3	3,3	20,1	28,7	10,0	34,2	39,0
NS B	10	6,2	6,6	6,7	6,8	9,5	9,8	8,6	18,7	37,8	11,5	50,3	87,0	22,5	117,3	145,8
	20	3,7	4,1	4,7	4,6	5,3	7,0	5,6	12,4	31,0	7,9	38,5	63,6	12,8	80,2	94,0
	30	2,9	3,2	3,5	3,7	5,0	6,2	4,2	10,9	28,4	6,5	34,4	51,0	11,0	65,8	73,9
	40	2,6	3,0	3,0	3,1	4,7	5,9	4,0	10,3	22,7	5,8	30,9	42,9	10,8	54,3	60,0
	50	2,3	2,7	2,7	2,8	4,3	5,3	3,8	9,8	21,3	5,2	27,7	39,9	10,0	47,0	53,9
NS C	10	4,0	3,9	4,7	4,9	7,9	10,6	7,0	16,0	29,4	10,2	43,0	71,0	21,1	110,7	125,6
	20	3,1	3,6	3,7	4,0	5,9	7,5	5,5	12,2	26,6	7,3	33,0	54,8	11,6	68,9	82,4
	30	2,8	3,5	3,6	3,6	5,5	6,5	4,5	11,4	24,5	6,1	29,9	43,9	10,3	56,7	63,4
	40	2,8	3,4	3,5	3,4	4,9	6,4	4,3	10,1	19,7	5,5	27,0	37,0	10,2	46,4	52,3
	50	2,6	3,3	3,5	3,1	4,5	6,3	3,9	9,1	18,4	5,0	23,8	34,4	8,9	40,8	46,5
NS D	10	3,5	4,1	4,5	5,0	7,6	9,3	6,8	15,6	28,3	9,3	37,3	58,9	16,3	85,7	107,1
	20	3,5	4,0	4,2	4,4	6,6	8,0	5,5	11,8	23,0	7,4	28,0	46,8	11,3	58,9	69,8
	30	3,4	3,8	3,9	3,9	5,8	7,2	4,9	10,8	20,7	6,1	25,4	37,7	9,5	48,1	54,3
	40	3,1	3,7	3,9	3,7	5,4	6,7	4,6	9,8	16,7	5,8	23,0	31,8	9,4	40,2	45,4
	50	3,0	3,6	3,9	3,6	5,2	6,4	4,2	9,2	15,7	5,4	20,4	29,5	8,4	34,6	39,4
NS E	10	3,2	3,4	3,5	3,2	5,2	6,7	4,2	10,1	17,0	5,4	19,0	30,6	9,1	42,9	51,8
	20	2,9	3,1	3,4	3,2	4,5	5,8	4,0	8,0	12,2	5,3	14,6	23,0	6,9	29,2	37,2
	30	2,9	3,3	3,4	3,3	4,3	5,3	4,0	6,9	9,8	4,8	13,3	18,7	6,5	25,8	29,3
	40	2,9	3,3	3,4	3,3	4,4	5,0	3,8	6,4	9,3	4,7	11,5	16,5	6,5	21,5	24,4
	50	2,9	3,3	3,4	3,2	4,2	4,9	3,9	6,1	8,3	4,4	10,7	15,9	5,7	18,9	21,6

Comparando-se os fatores de equivalência com relação à FFS, a Tabela 8.10 apresenta a diferença absoluta entre os equivalentes obtidos para FFS de 110 km/h (Tabela 8.8) e de 100 km/h (Tabela 8.9). Observa-se que 43% dos equivalentes veiculares obtidos para FFS de

110 km/h foram maiores que os obtidos para 100 km/h – geralmente, para NS A e aclives maiores do que 4%. Os demais fatores de equivalência (56%) diminuíram com o aumento da FFS, como mostra os valores em destaque na Tabela 8.10. Com estes resultados, não é possível concluir que haja influência da FFS no valor do equivalente baseado na velocidade dos automóveis.

Tabela 8.10: Diferença absoluta entre equivalentes veiculares obtidos com FFS de 110 km/h e de 100 km/h

Greides - inclinação e comprimento (km)																
	% de cam.	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	10	-0,7	-1,2	-1,1	-0,5	-1,8	-0,2	-0,4	0,7	5,8	1,9	28,9	88,1	28,5	132,1	228,4
	20	-0,4	-0,5	-0,5	-0,3	-0,1	0,6	0,1	5,0	20,1	1,2	25,8	75,0	16,2	86,0	130,6
	30	0,0	-0,2	0,2	-0,1	0,3	0,6	0,3	4,5	18,4	0,9	24,4	55,6	11,9	64,5	99,5
	40	0,2	-0,1	0,2	0,1	0,4	0,6	0,4	4,7	22,7	0,7	24,0	49,1	7,3	61,3	79,7
	50	0,2	0,1	0,2	0,2	0,7	0,7	0,1	4,1	17,0	0,8	22,2	38,7	6,3	51,5	68,3
NS B	10	-4,5	-4,6	-4,1	-4,2	-4,7	-3,5	-4,1	-4,1	-8,5	-3,3	-8,8	17,3	11,1	37,5	76,7
	20	-1,8	-1,8	-2,2	-2,0	-0,6	-1,3	-1,6	-1,3	-3,3	-2,0	-2,8	21,2	6,6	20,2	42,1
	30	-0,9	-1,0	-1,0	-1,1	-0,7	-0,6	-0,7	-1,4	-2,1	-1,3	-0,9	12,4	4,2	12,5	28,2
	40	-0,5	-0,7	-0,4	-0,6	-0,6	-0,4	-0,7	-1,2	3,8	-1,0	1,3	12,2	1,5	12,5	27,3
	50	-0,3	-0,3	0,0	-0,3	-0,3	-0,1	-0,7	-1,6	1,1	-0,6	1,3	7,5	1,0	11,2	18,5
NS C	10	-1,3	-0,4	-1,0	-1,2	-1,5	-2,0	-1,8	-1,5	1,2	-1,8	-4,9	14,2	-1,2	15,8	58,5
	20	-0,4	-0,2	-0,1	-0,7	-0,2	-0,6	-0,8	-0,1	-2,8	-0,8	-4,1	14,8	1,9	13,9	30,6
	30	-0,2	-0,1	0,0	-0,3	0,1	0,1	-0,2	-1,4	-1,2	-0,1	-2,5	8,6	0,6	8,7	21,6
	40	-0,2	0,0	0,1	-0,1	0,2	-0,1	-0,3	-1,2	2,2	-0,2	-0,5	8,0	-0,4	8,9	20,5
	50	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	-0,3	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,1	5,3	0,1	9,7	18,2
NS D	10	-0,3	-0,1	-0,3	-0,9	-0,7	0,6	-1,2	-3,2	-5,2	-1,5	-9,2	-1,1	-1,7	-21,0	27,9
	20	-0,2	-0,2	0,0	-0,6	-0,6	-0,6	-0,8	-1,0	-5,0	-1,2	-7,3	6,0	-1,0	-11,0	10,8
	30	-0,3	-0,1	0,2	-0,3	-0,1	-0,6	-0,5	-2,2	-5,5	-0,2	-6,3	0,7	-1,0	-6,4	-0,7
	40	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-1,9	-0,8	-0,5	-5,9	-0,3	-1,7	-1,8	2,3
	50	-0,2	0,1	-0,3	-0,1	0,0	-0,6	-0,3	-1,6	-2,2	-0,4	-4,6	1,7	-1,4	0,1	2,0
NS E	10	-0,3	0,4	0,9	0,3	-0,2	1,1	-0,4	-2,1	-1,8	0,0	-1,4	2,1	-2,7	-8,1	8,5
	20	-0,2	0,1	0,9	-0,2	0,0	-0,1	-0,4	0,1	-0,3	-0,6	-1,4	6,0	-1,4	-1,4	7,6
	30	-0,2	-0,1	0,8	-0,3	0,0	0,2	-0,5	-0,6	1,0	-0,1	-1,9	1,8	-1,0	1,0	3,0
	40	-0,3	-0,1	0,5	-0,3	-0,1	0,1	-0,3	-0,4	0,2	-0,2	-0,5	0,9	-1,0	0,9	3,4
	50	-0,2	-0,1	0,0	-0,3	-0,1	-0,5	-0,4	-0,2	1,4	-0,1	0,7	0,2	-0,9	1,3	2,0

Os resultados dos equivalentes determinados para o critério da mesma velocidade dos automóveis mostraram-se muito maiores do que os valores apresentados no HCM-2000 e os obtidos no estudo de Demarchi [2000], ambos calculados com base na densidade. Em alguns casos, como rampas maiores que 6% de greide e 1,25 km de extensão, os valores desta pesquisa superaram o valor de 100 carros de passeio equivalente (cpe), enquanto que, no HCM-

2000, os valores são inferiores a 7 cpe e, na pesquisa de Demarchi [2000], inferiores a 25,1 cpe. Vale lembrar a existência de certas diferenças nas três pesquisas: os equivalentes do HCM-2000 foram determinados a partir de outro método de cálculo e com condições do tráfego bastante diferentes desta pesquisa; na pesquisa de Demarchi [2000], a composição típica de caminhões e o simulador de tráfego foram diferentes dos usados nesta investigação. Mesmo assim, observa-se que a velocidade dos automóveis como critério de equivalência implica em maior impacto dos caminhões na corrente de tráfego o que, por sua vez, acarreta em redução da capacidade de tráfego na rodovia.

Para melhor analisar as diferenças encontradas entre essas pesquisas analisadas, optou-se por determinar, também, equivalentes veiculares usando-se a densidade como medida de desempenho, para as mesmas condições de simulações e o mesmo método de cálculo.

8.3.3. Equivalentes veiculares baseados na densidade

Para comparar os equivalentes obtidos com base na velocidade dos automóveis, foram determinados fatores de equivalência utilizando a densidade como medida de impedância. A Tabela 8.11 apresenta os equivalentes veiculares para rodovias de pista dupla com duas faixas de tráfego por sentido e FFS de 110 km/h.

Tabela 8.11: Equivalentes veiculares para caminhões típicos baseado na densidade e FFS = 110 km/h

Greides - inclinação e comprimento (km)																
	% de cam.	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	10	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,4	1,2	1,7	2,8	1,3	3,0	4,5	1,9	4,9	6,3
	20	1,0	1,1	1,1	1,1	1,3	1,4	1,2	1,7	2,4	1,3	2,5	3,7	1,6	3,9	4,9
	30	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,4	1,2	1,7	2,3	1,3	2,5	3,3	1,5	3,4	4,2
	40	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,5	1,2	1,7	2,3	1,3	2,4	3,2	1,5	3,2	3,9
	50	1,1	1,1	1,2	1,1	1,4	1,5	1,2	1,7	2,3	1,3	2,4	3,0	1,5	3,1	3,6
NS B	10	1,1	1,2	1,4	1,2	1,5	1,8	1,4	2,5	4,0	1,7	4,2	5,9	2,3	6,2	7,9
	20	1,1	1,2	1,4	1,2	1,6	1,9	1,4	2,4	3,2	1,6	3,4	4,5	2,1	4,6	5,7
	30	1,2	1,3	1,4	1,3	1,7	2,0	1,4	2,3	2,8	1,7	3,0	3,9	2,1	4,0	4,7
	40	1,2	1,4	1,5	1,3	1,8	2,0	1,5	2,2	2,7	1,9	2,9	3,5	2,1	3,6	4,4
	50	1,2	1,6	1,7	1,4	1,9	2,0	1,8	2,2	2,7	1,9	2,8	3,3	2,0	3,4	4,1
NS C	10	1,3	1,5	2,0	1,5	2,6	3,0	1,9	3,7	5,3	2,5	5,6	7,9	3,2	8,1	10,0
	20	1,5	1,8	2,0	1,8	2,3	2,8	2,0	3,1	4,1	2,4	4,3	5,4	2,9	5,6	6,6
	30	1,7	1,9	2,0	1,8	2,3	2,6	2,1	3,0	3,6	2,4	3,8	4,4	2,8	4,6	5,3
	40	1,7	2,0	2,0	1,9	2,3	2,6	2,1	2,9	3,3	2,7	3,4	3,9	3,1	4,1	4,8
	50	1,8	2,0	2,1	2,0	2,5	2,7	2,5	2,9	3,1	2,6	3,2	3,6	2,9	3,9	4,5
NS D	10	2,3	2,9	3,2	2,5	3,7	4,2	3,0	4,7	6,5	3,8	6,7	8,6	4,2	8,8	10,9
	20	2,1	2,6	2,6	2,4	3,0	3,5	2,7	3,9	4,6	3,1	4,9	5,8	3,8	6,0	6,8
	30	2,2	2,6	2,6	2,3	2,9	3,1	2,8	3,4	3,9	3,0	4,1	4,7	3,5	4,8	5,4
	40	2,2	2,5	2,5	2,4	2,8	2,9	2,7	3,2	3,6	3,3	3,5	4,1	3,7	4,6	4,8
	50	2,2	2,6	2,5	2,4	2,9	3,0	2,8	3,3	3,5	3,1	3,5	3,7	3,5	4,2	4,6
NS E	10	2,6	3,5	3,9	3,0	4,2	4,6	3,7	4,8	6,3	4,0	7,3	7,9	4,4	7,9	10,1
	20	2,4	3,0	2,9	2,7	3,3	3,5	2,8	4,1	4,4	3,5	4,9	5,5	4,1	5,5	6,1
	30	2,3	3,0	2,8	2,6	3,0	3,1	3,1	3,4	3,6	3,5	4,2	4,5	3,6	4,6	4,9
	40	2,3	2,7	2,6	2,6	3,0	2,9	2,9	3,2	3,3	3,5	3,5	3,9	3,8	4,5	4,6
	50	2,4	2,8	2,6	2,6	3,0	3,0	2,9	3,4	3,3	3,2	3,5	3,6	3,7	4,0	4,2

Tal como realizado com a velocidade dos automóveis, foram determinados valores de equivalentes para as duas velocidades de fluxo livre (FFS). A Tabela 8.12 apresenta os fatores de equivalência para rodovias de pista dupla com duas faixas de tráfego e FFS de 100 km/h.

Tabela 8.12: Equivalentes veiculares para caminhões típicos baseado na densidade e FFS = 100 km/h

Greides - inclinação e comprimento (km)																
	% de cam.	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	10	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,2	1,7	2,4	1,4	2,9	3,9	1,7	4,4	5,5
	20	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,2	1,7	2,3	1,3	2,5	3,4	1,6	3,6	4,4
	30	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,2	1,7	2,2	1,3	2,5	3,1	1,5	3,3	3,8
	40	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,4	1,2	1,7	2,2	1,3	2,3	2,9	1,5	3,1	3,5
	50	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,4	1,2	1,7	2,2	1,3	2,3	2,8	1,5	2,9	3,3
NS B	10	1,2	1,2	1,2	1,3	1,5	1,7	1,4	2,4	3,7	1,7	4,0	5,4	2,3	5,8	7,1
	20	1,2	1,2	1,2	1,3	1,6	1,8	1,4	2,3	3,0	1,7	3,3	4,1	2,1	4,4	5,1
	30	1,2	1,2	1,3	1,3	1,6	1,8	1,4	2,1	2,7	1,7	3,0	3,5	2,1	3,8	4,4
	40	1,2	1,3	1,4	1,3	1,7	1,8	1,4	2,1	2,6	1,7	2,8	3,2	2,0	3,5	4,0
	50	1,2	1,4	1,5	1,3	1,7	1,9	1,4	2,1	2,5	1,7	2,6	3,1	2,0	3,3	3,8
NS C	10	1,3	1,4	1,5	1,6	2,1	2,6	2,0	3,7	4,8	2,3	5,4	7,0	3,4	7,4	9,0
	20	1,4	1,5	1,6	1,6	2,1	2,6	2,0	3,0	3,7	2,3	4,1	5,0	2,8	5,2	5,9
	30	1,5	1,8	1,8	1,8	2,1	2,4	2,0	2,8	3,3	2,3	3,6	4,1	2,7	4,4	5,0
	40	1,7	1,9	1,9	1,8	2,2	2,4	2,0	2,7	3,0	2,3	3,2	3,7	2,7	4,0	4,4
	50	1,7	1,9	1,9	1,9	2,2	2,4	2,1	2,6	2,9	2,4	3,1	3,5	2,7	3,7	4,1
NS D	10	2,1	2,2	2,5	2,2	3,1	3,8	2,5	4,7	6,2	3,3	6,6	8,4	4,5	8,5	10,5
	20	2,1	2,3	2,4	2,3	3,0	3,3	2,6	3,8	4,5	3,2	4,8	5,6	3,6	5,9	6,6
	30	2,1	2,4	2,4	2,3	2,9	3,0	2,6	3,5	3,8	3,2	4,0	4,4	3,6	4,8	5,5
	40	2,1	2,5	2,4	2,4	2,8	2,8	2,6	3,1	3,4	3,0	3,6	4,0	3,4	4,3	4,7
	50	2,2	2,5	2,4	2,4	2,7	2,9	2,6	3,0	3,2	2,9	3,4	3,7	3,2	4,0	4,4
NS E	10	2,2	2,6	3,3	2,8	3,5	3,9	3,1	5,0	6,4	3,3	6,5	8,5	4,8	8,5	10,8
	20	2,2	2,7	2,8	2,7	3,0	3,5	3,0	3,8	4,7	3,3	5,0	5,5	3,9	5,8	6,4
	30	2,3	2,7	2,7	2,7	3,0	3,2	3,0	3,7	4,0	3,6	4,1	4,3	3,9	4,7	5,2
	40	2,3	2,7	2,6	2,7	3,0	3,2	3,0	3,3	3,4	3,3	3,5	3,8	3,5	4,3	4,4
	50	2,3	2,7	2,6	2,7	3,0	3,2	3,0	3,1	3,2	3,1	3,3	3,5	3,4	4,0	4,3

Os resultados obtidos com o critério da mesma densidade (Tabela 8.11 e Tabela 8.12) mostram que, ao contrário das tabelas do HCM-2000 e de Demarchi [2000], os equivalentes em trechos planos (0% de greide) apresentam variação nos valores com o aumento do comprimento da rampa. Quanto à variação dos equivalentes veiculares, os valores obtidos nesta pesquisa para FFS de 100 km/h (Tabela 8.12) variaram de 1,0 a 10,8 carros de passeio equivalente (cpe). Os equivalentes veiculares determinados por Demarchi [2000], FFS de 102 km/h, variaram de 1,2 a 25,1 cpe, enquanto, no HCM-2000, os fatores de equivalência variam de 1,5 a 7,0 cpe – independente da FFS considerada.

Considerando os fatores de equivalência obtidos nesta pesquisa, para as duas medidas de impedância (velocidade dos automóveis e densidade), observa-se que os equivalentes calculados pelo critério da velocidade dos automóveis (Tabela 8.8 e Tabela 8.9) são maiores do

que os calculados pela densidade (Tabela 8.11 e Tabela 8.12). Para rampas com maiores inclinação e comprimento, os valores dos equivalentes com base na velocidade dos automóveis são muito maiores do que os baseados na densidade. Essa significativa diferença deve-se ao fato de a medida velocidade dos automóveis ser muito sensível à presença de caminhões na corrente de tráfego. A Figura 8.9 ilustra este fato na determinação dos fluxos básico e misto para o cálculo do equivalente veicular.

Figura 8.9: Determinação dos fluxos básico (q_b) e misto (q_m) para $L = 2.000$ m, $i = 4\%$ e $p = 30\%$

A Figura 8.9 apresenta a obtenção do equivalente veicular, para as duas medidas de desempenho, em uma rampa de 2.000 m, com greide de 4% e 30% de caminhões no tráfego (fluxo misto). Na Figura 8.9a, os fluxos básico q_b e misto q_m , correspondentes ao nível de serviço C (103 km/h), são de 1.545 cpe/h.faixa e 210 veic/h.faixa, respectivamente, o que resulta em equivalente veicular de 23,3 cpe. Para a medida densidade (Figura 8.9b), os fluxos q_b e q_m correspondentes ao nível C (15 veic/km.faixa) são, respectivamente, 1.545 cpe/h.faixa e 871 veic/h.faixa, resultando em 3,6 cpe.

Dessa forma, pode-se concluir que a estimativa do impacto dos caminhões na corrente de tráfego usando-se os equivalentes baseados na velocidade dos automóveis será maior que o impacto estimado pelos equivalentes calculados a partir da densidade.

8.4. ANÁLISE PRÁTICA DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA

Para uma análise prática, foram elaboradas tabelas de fluxos máximos por faixa de tráfego para comparação nível de serviço estimado. O item 8.4.1 avalia a implicação do uso da medida de desempenho nos fluxos de serviços e, conseqüentemente, no nível de serviço. O item 8.4.2 traz os resultados obtidos no nível de serviço usando-se os equivalentes baseados apenas na densidade, utilizando os equivalentes desta pesquisa, os apresentados por Demarchi [2000] e os do HCM-2000.

8.4.1. Análise comparativa entre as medidas de impedância

Para fins práticos, Demarchi [2000] sugere utilizar tabelas de fluxos máximos por faixa de tráfego para cada nível de serviço, os denominados fluxos de serviço. Dessa forma, os fluxos de serviço obtidos através do critério da mesma velocidade dos automóveis estão apresentados na Tabela 8.13, para FFS de 110 km/h, e na Tabela 8.14, para FFS de 100 km/h. Observe-se que os baixos fluxos de serviço obtidos refletem o impacto dos maiores fatores de equivalência calculados para esta medida de impedância. Os fluxos de serviços do nível E correspondem à capacidade da via, em veíc/h.faixa.

Tabela 8.13: Fluxos de serviço (veíc/h.faixa) usando a velocidade dos automóveis como medida de impedância e para FFS de 110 km/h

Greides - inclinação e comprimento (km)																
	% cam	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	0	650	650	650	650	650	650	650	650	214	650	650	214	158	102	100
	10	648	640	622	600	555	430	514	306	129	387	90	40	106	28	19
	20	630	615	594	560	480	391	461	200	71	330	57	26	97	22	16
	30	574	565	512	514	389	337	421	153	53	300	42	23	86	19	14
	40	549	544	487	484	340	295	381	122	40	282	34	20	82	16	13
	50	519	508	463	453	302	269	350	108	39	253	30	19	75	15	12
NS B	0	1065	1065	1065	1060	1065	1060	1060	1065	600	1060	775	504	372	240	231
	10	991	970	920	916	772	696	789	452	278	620	211	94	250	65	46
	20	900	850	820	803	610	551	669	353	168	537	134	60	228	51	38
	30	810	780	742	717	535	448	605	299	124	474	99	54	203	44	34
	40	750	709	651	667	478	383	552	252	95	425	79	47	193	39	30
	50	699	627	575	610	426	343	518	232	91	381	71	44	177	36	29
NS C	0	1545	1545	1545	1545	1545	1545	1545	1545	1080	1475	935	806	648	420	408
	10	1322	1237	1212	1213	1001	880	1085	658	390	886	328	164	534	114	80
	20	1145	1050	1010	1055	800	706	883	480	278	734	235	105	441	89	66
	30	1053	903	864	921	650	574	774	418	201	620	173	94	389	76	59
	40	936	795	752	812	583	498	707	371	165	572	138	83	341	68	52
	50	870	724	679	730	526	439	648	310	159	526	124	76	309	60	47
NS D	0	1930	1930	1930	1910	1808	1759	1877	1723	1612	1749	1282	1115	1200	800	777
	10	1581	1487	1462	1478	1212	1020	1321	900	601	1146	520	289	819	262	134
	20	1316	1240	1176	1244	966	850	1104	650	439	944	390	170	677	186	114
	30	1183	1073	1007	1090	799	720	955	586	367	785	300	158	594	146	115
	40	1104	940	902	950	705	620	850	511	278	708	260	146	524	121	98
	50	1005	820	840	850	622	570	780	450	267	647	230	120	483	108	91
NS E	0	2100	2100	2100	2060	2023	1994	2014	1930	1850	1998	1600	1568	1850	1320	1346
	10	1771	1638	1573	1683	1503	1250	1639	1236	867	1460	790	504	1361	480	303
	20	1570	1462	1272	1493	1234	1086	1388	867	660	1212	610	318	1110	330	215
	30	1400	1266	1079	1320	1050	896	1193	811	534	1002	511	307	898	240	202
	40	1271	1128	978	1173	910	798	1056	702	478	869	420	278	755	220	179
	50	1130	1005	950	1079	826	771	930	610	391	798	340	246	724	198	171

Tabela 8.14: Fluxos de serviço (veíc/h.faixa) usando a velocidade dos automóveis como medida de impedância e para FFS de 100 km/h

Greides - inclinação e comprimento (km)																
	% cam	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	0	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	176	219
	10	540	509	498	515	429	380	447	283	130	389	134	78	177	58	51
	20	516	500	480	472	421	377	423	257	113	337	93	58	168	47	40
	30	514	481	477	451	368	329	402	200	86	305	71	50	145	39	35
	40	511	471	465	438	333	295	374	168	81	283	61	45	116	36	32
	50	502	459	440	425	320	282	324	147	71	267	55	39	105	33	29
NS B	0	960	960	960	960	960	960	960	960	673	960	960	673	646	334	265
	10	633	617	610	609	518	510	545	347	205	468	162	100	305	76	62
	20	624	593	550	557	516	436	501	293	137	403	113	71	285	57	49
	30	610	574	551	533	438	375	489	242	104	363	87	60	240	47	42
	40	583	535	530	524	389	326	433	203	99	328	74	54	195	43	39
	50	575	519	513	507	359	303	398	178	86	308	67	47	175	40	35
NS C	0	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1000	1400	1244	1000	902	560	444
	10	1078	1087	1022	1008	829	714	877	559	365	729	269	175	465	117	104
	20	983	922	905	870	705	607	735	432	229	617	189	119	450	96	81
	30	914	804	780	783	599	527	678	341	174	554	145	101	370	79	71
	40	822	720	704	718	544	443	605	302	165	499	123	91	299	73	65
	50	770	650	629	683	506	385	568	276	144	467	113	79	282	67	59
NS D	0	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1280	1750	1544	1280	1164	860	666
	10	1440	1375	1337	1289	1087	985	1141	732	483	983	389	265	712	190	155
	20	1196	1132	1091	1069	850	753	951	571	333	789	281	177	590	143	122
	30	1052	978	963	969	735	632	832	458	261	711	216	150	509	119	106
	40	980	859	840	866	649	550	742	398	247	616	184	135	413	108	96
	50	911	780	732	775	579	485	698	354	215	562	168	118	383	101	89
NS E	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1822	1925	1858	1763	1811	1600	1300
	10	1640	1609	1598	1638	1406	1271	1517	1049	768	1390	715	505	1102	385	329
	20	1453	1399	1355	1393	1174	1016	1243	833	618	1077	538	370	917	301	243
	30	1270	1174	1170	1181	998	872	1056	723	548	932	427	317	751	237	211
	40	1136	1032	1027	1044	848	771	943	629	464	807	386	278	628	217	193
	50	1034	935	916	945	762	682	822	562	428	734	342	236	600	201	177

Para o critério da mesma densidade, os fluxos de serviço obtidos estão apresentados na Tabela 8.15, para FFS de 110 km/h, e na Tabela 8.16, para FFS de 100 km/h.

Tabela 8.15: Fluxos de serviço (veíc/h.faixa) usando a densidade como medida de impedância e para FFS de 110 km/h

Greides - inclinação e comprimento (km)																
	% cam	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	0	650	650	650	650	650	650	650	650	630	650	650	630	620	600	610
	10	648	645	645	644	636	626	637	608	553	630	543	482	599	468	424
	20	644	642	640	636	619	602	625	566	507	609	497	424	579	412	366
	30	639	634	630	628	597	573	614	539	469	594	452	382	561	377	331
	40	634	624	614	620	573	542	601	511	427	577	414	349	541	345	299
	50	627	608	592	610	549	518	588	480	395	559	388	326	523	320	280
NS B	0	1065	1065	1065	1060	1065	1060	1060	1065	1060	1060	1015	1060	990	950	990
	10	1052	1045	1020	1041	1011	988	1025	927	817	999	804	715	944	701	630
	20	1035	1019	980	1018	952	903	987	831	741	949	723	630	871	616	551
	30	1015	977	959	987	876	812	944	765	690	877	661	574	793	564	507
	40	988	914	875	946	800	759	874	718	627	775	607	530	735	520	454
	50	949	823	800	871	745	710	766	661	579	745	566	497	713	481	415
NS C	0	1545	1545	1545	1545	1545	1545	1545	1545	1520	1545	1460	1500	1450	1400	1350
	10	1495	1472	1400	1469	1331	1290	1422	1216	1080	1344	1057	913	1268	905	812
	20	1398	1331	1280	1334	1229	1144	1287	1084	957	1206	927	819	1122	805	730
	30	1285	1228	1196	1253	1103	1038	1161	969	871	1084	838	762	1000	745	674
	40	1211	1116	1094	1145	1009	947	1062	869	804	926	796	718	840	686	617
	50	1115	1016	987	1043	883	833	891	786	747	852	734	665	790	626	564
NS D	0	1930	1930	1930	1920	1930	1920	1910	1900	1860	1900	1800	1760	1850	1700	1630
	10	1711	1627	1581	1680	1518	1464	1605	1411	1245	1510	1233	1094	1457	1082	969
	20	1582	1466	1458	1507	1374	1290	1448	1229	1124	1360	1090	985	1241	967	894
	30	1411	1292	1307	1375	1221	1186	1258	1119	1038	1198	1000	916	1102	901	835
	40	1310	1198	1200	1238	1111	1085	1138	1017	955	1013	967	863	935	796	763
	50	1191	1084	1090	1130	993	955	1011	890	862	940	862	813	853	747	693
NS E	0	2100	2100	2100	2060	2030	2030	2020	2010	2000	2010	1950	1920	1940	1870	1800
	10	1810	1683	1631	1750	1590	1544	1650	1523	1373	1610	1290	1245	1570	1243	1101
	20	1650	1504	1530	1561	1443	1393	1540	1300	1248	1400	1180	1104	1290	1104	1035
	30	1500	1318	1370	1430	1301	1300	1280	1224	1180	1200	1070	1020	1180	1013	964
	40	1370	1243	1280	1280	1173	1182	1200	1115	1091	1060	1050	976	990	878	867
	50	1250	1104	1170	1180	1060	1050	1080	947	977	1000	929	922	900	841	801

Tabela 8.16: Fluxos de serviço (veíc/h.faixa) usando a densidade como medida de impedância e para FFS de 100 km/h

<i>Greides - inclinação e comprimento (km)</i>																
	% cam	0%			2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	0	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	580	560	550
	10	580	580	580	575	567	562	569	543	507	560	489	450	540	432	400
	20	575	575	576	569	558	545	560	512	458	546	444	391	521	380	347
	30	570	571	571	565	542	525	552	485	426	533	401	358	502	345	314
	40	568	563	562	561	528	503	542	457	392	517	377	329	482	316	290
	50	565	554	549	553	512	474	533	429	367	507	352	304	462	297	270
NS B	0	960	960	960	960	960	960	960	960	940	960	960	940	930	880	870
	10	942	941	939	932	912	894	920	839	756	895	740	666	849	650	595
	20	932	922	922	913	863	828	887	766	690	845	659	589	790	572	525
	30	918	894	891	892	813	768	850	715	636	796	600	545	730	525	475
	40	897	851	830	858	759	718	820	660	585	748	564	508	690	483	434
	50	868	796	776	830	717	660	800	612	549	713	527	463	641	448	404
NS C	0	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1340	1400	1380	1340	1320	1250	1260
	10	1363	1345	1337	1326	1259	1202	1270	1103	1014	1239	974	873	1127	855	779
	20	1287	1265	1260	1248	1150	1064	1171	994	906	1120	864	780	1023	757	708
	30	1214	1138	1133	1139	1041	993	1068	915	828	1007	790	726	921	696	636
	40	1111	1037	1042	1052	946	900	993	830	772	916	739	678	825	638	591
	50	1038	973	960	982	874	827	911	769	721	824	683	629	764	593	552
NS D	0	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1700	1800	1750	1680	1700	1600	1560
	10	1620	1602	1566	1610	1483	1401	1569	1311	1183	1461	1151	1035	1335	1028	921
	20	1479	1432	1413	1425	1290	1232	1373	1159	1056	1255	1019	940	1180	911	848
	30	1350	1273	1280	1285	1150	1122	1210	1028	986	1079	942	885	1016	839	770
	40	1254	1127	1151	1166	1038	1044	1100	970	927	998	878	821	927	774	731
	50	1122	1042	1044	1057	984	924	996	890	853	923	815	769	851	715	666
NS E	0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1910	1950	1910	1870	1900	1810	1780
	10	1791	1720	1628	1700	1600	1550	1650	1430	1300	1620	1290	1143	1450	1140	1008
	20	1620	1502	1464	1500	1430	1340	1430	1280	1149	1361	1115	1050	1270	1020	960
	30	1450	1324	1334	1320	1250	1200	1260	1100	1050	1129	1040	1005	1065	950	887
	40	1300	1202	1216	1200	1100	1060	1120	1050	1030	1042	994	950	997	867	846
	50	1198	1089	1099	1080	1010	960	1000	975	950	980	920	894	900	800	750

Pode-se observar que os fluxos de serviço obtidos para o critério da densidade são maiores que os fluxos de serviço obtidos pelo critério da velocidade dos automóveis. Desta forma, para um determinado fluxo de tráfego, o nível de serviço estimado pelo critério da velocidade dos automóveis será pior que o estimado pelo critério da densidade. O exemplo a seguir ilustrar este efeito, considerando-se o fluxo veicular observado na caracterização do tráfego em dias típicos apresentados no Capítulo 5 e no Apêndice A.

De modo geral, o fluxo de tráfego no dia típico em praças de pedágio localizados nas

rodovias do interior do estado de São Paulo, com duas faixas de tráfego, foi da ordem de 415 veíc/h (208 veíc/h.faixa) e 30% de caminhões no tráfego (p). Considerando-se, como exemplo, FFS de 110 km/h e rampa com 4% de greide (i) e 1,25 km de comprimento (L). Para esta situação os fluxos de serviços para cada medida de impedância são apresentados na Tabela 8.17 – obtidos das Tabela 8.13 (velocidade dos automóveis) e Tabela 8.15 (densidade).

Tabela 8.17: Exemplo de fluxos de serviço para $i = 4\%$, $L = 1,25$ km e $p = 30\%$

FFS	Medida de impedância	Fluxo de serviço (veíc/h.faixa)				
		NS A	NS B	NS C	NS D	NS E
110 km/h	Velocidade dos automóveis	153	299	418	586	811
	Densidade	539	765	969	1.119	1.224

Como o fluxo de tráfego típico é 208 veíc/h.faixa, o nível de serviço estimado para o critério da velocidade dos automóveis é NS B, pois o fluxo máximo neste nível de serviço é de 299 veíc/h.faixa, conforme Tabela 8.17. Para o critério da densidade, o nível de serviço estimado seria NS A, pois o fluxo máximo é 539 veíc/h.faixa (Tabela 8.17). Não se sabe, ao certo, qual resultado representa fielmente as condições analisadas, porém, de fato, a estimativa do nível de serviço pelo critério da mesma velocidade dos automóveis será degradada com relação ao critério da densidade.

8.4.2. Análise comparativa com outros estudos

A velocidade dos automóveis como medida de impedância apresentou fatores de equivalência muito elevados e, conseqüentemente, piores níveis de serviço. Como a literatura recomenda a densidade como medida de impedância e, nesta pesquisa, foram determinados novos valores de equivalentes veiculares baseados na densidade, este item compara os níveis de serviços obtidos usando-se os fatores de equivalência desta pesquisa, os apresentados no estudo de Demarchi [2000] e os do HCM-2000 – todos baseados na densidade.

A Tabela 8.18 traz dois exemplos utilizados por Demarchi [2000] e os compara com o resultado obtido ao utilizar os equivalentes desta pesquisa e os equivalentes do HCM-2000, os

três estudos utilizaram a densidade como medida de impedância. O Exemplo 1 refere-se ao limite do NS A, enquanto o Exemplo 2 ilustra um caso de capacidade da rodovia (NS E).

Tabela 8.18: Comparação do nível de serviço com base na densidade

<i>Exemplo 1</i>	<i>Exemplo 2</i>
FFS = 100 km/h L = 1,25 km i = 6% p = 10%	FFS = 100 km/h L = 1,25 km i = 4% p = 10%
Demarchi [2000]*	
$q_m = 486$ veíc/h.faixa $k = 6$ cpe/km.faixa (NSA)	$q_m = 1272$ veíc/h.faixa $k = 28$ cpe/km.faixa (NSE)
Cunha [2007] (densidade)	
$E_T = 2,9$ (Tabela 8.12) $q_b = 486 \cdot [1+0,1 \cdot (2,9-1)] = 578$ cpe/h.faixa	$E_T = 5,0$ (Tabela 8.12) $q_b = 1272 \cdot [1+0,1 \cdot (5,0-1)] = 1781$ cpe/h.faixa
$u = 100$ km/h $k = 578 / 100 = 5,9$ cpe/km.faixa (NSA)	$u = 90$ km/h $k = 1781 / 90 = 19,8$ cpe/km.faixa (NSD)
HCM-2000 [TRB, 2000]	
$E_T = 3,0$ (Tabela 21-9 p. 21-10) $q_b = 486 \cdot [1+0,1 \cdot (3,0-1)] = 583$ cpe/h.faixa	$E_T = 2,5$ (Tabela 21-9 p. 21-10) $q_b = 1272 \cdot [1+0,1 \cdot (2,5-1)] = 1463$ cpe/h.faixa
$u = 100$ km/h $k = 583 / 100 = 5,8$ cpe/km.faixa (NSA)	$u = 99,6$ km/h $k = 1463 / 99,6 = 14,7$ cpe/km.faixa (NSC)

* Exemplos extraído de Demarchi [2000], Tabela 8.6 – página 141.

Para o Exemplo 1 da Tabela 8.18, os três estudos estimaram o mesmo nível de serviço (NSA) e as densidades obtidas foram iguais. Para o Exemplo 2, a diferença percentual relativa entre a densidade obtida nesta pesquisa (19,8 cpe/km.faixa) e a obtida usando-se o HCM-2000 (14,7 cpe/km.faixa) foi de -25,8%, o que resultou em um pior nível de serviço (NS D) do que o estimado pelo HCM-2000 (NS C); comparando-se a densidade desta pesquisa com o de Demarchi [2000], a diferença percentual relativa foi de 41,4%, resultando um nível de serviço melhor (NS D) do que o estimado por Demarchi [2000] (NS E).

Para uma análise prática entre as duas pesquisas realizadas em rodovias paulistas, a Tabela 8.19 traz a diferença percentual relativa entre os fluxos de serviços obtidos nesta pesquisa, para o critério da densidade (Tabela 8.16), e os fluxos apresentados no estudo de Demarchi [2000].

Tabela 8.19: Diferença percentual relativa entre fluxos máximos de Demarchi [2000] e da Tabela 8.16

Nível de Serviço	Porcentagem de Caminhões	Greides - inclinação e comprimento (km)											
		2%			4%			6%			8%		
		0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00	0,50	1,25	2,00
NS A	0	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	9%	11%
	10	2%	2%	1%	1%	0%	4%	-1%	-1%	2%	-7%	-9%	-10%
	20	-1%	-2%	-2%	-3%	-4%	-1%	-5%	-9%	-6%	-18%	-15%	-16%
	30	-5%	-5%	-5%	-8%	-9%	-5%	-15%	-11%	-9%	-28%	-20%	-21%
	40	-9%	-9%	-8%	-14%	-14%	-8%	-22%	-16%	-14%	-33%	-26%	-24%
NS B	0	5%	5%	5%	5%	5%	8%	5%	5%	8%	9%	15%	16%
	10	-2%	-4%	-4%	-4%	-3%	3%	-8%	-5%	-3%	-14%	-12%	-13%
	20	-8%	-6%	-3%	-10%	-9%	-6%	-16%	-11%	-9%	-23%	-21%	-25%
	30	-14%	-9%	-6%	-19%	-12%	-9%	-21%	-13%	-15%	-27%	-25%	-25%
	40	-17%	-11%	-8%	-23%	-13%	-9%	-25%	-21%	-20%	-35%	-27%	-26%
NS C	0	7%	7%	7%	7%	7%	12%	7%	9%	12%	14%	20%	19%
	10	-9%	-10%	-8%	-13%	-9%	-6%	-18%	-11%	-8%	-20%	-15%	-17%
	20	-17%	-11%	-5%	-18%	-12%	-8%	-22%	-16%	-15%	-26%	-22%	-27%
	30	-16%	-10%	-7%	-18%	-13%	-11%	-24%	-18%	-18%	-29%	-25%	-28%
	40	-15%	-8%	-4%	-19%	-12%	-10%	-23%	-22%	-22%	-31%	-29%	-30%
NS D	0	8%	8%	8%	8%	8%	14%	8%	11%	16%	14%	22%	25%
	10	-19%	-15%	-10%	-22%	-13%	-9%	-23%	-14%	-13%	-24%	-19%	-19%
	20	-19%	-12%	-9%	-23%	-14%	-10%	-23%	-19%	-19%	-29%	-25%	-27%
	30	-16%	-7%	-5%	-20%	-13%	-12%	-21%	-21%	-45%	-28%	-28%	-28%
	40	-12%	-2%	-3%	-18%	-14%	-13%	-23%	-23%	-24%	-29%	-30%	-32%
NS E	0	12%	12%	12%	12%	12%	18%	15%	18%	20%	18%	24%	26%
	10	-15%	-11%	-9%	-19%	-11%	-4%	-23%	-14%	-8%	-23%	-15%	-13%
	20	-14%	-9%	-3%	-18%	-12%	-5%	-22%	-14%	-14%	-25%	-22%	-24%
	30	-7%	-1%	5%	-14%	-5%	-4%	-16%	-17%	-19%	-23%	-25%	-25%
	40	-3%	8%	14%	-10%	-6%	-6%	-16%	-20%	-20%	-25%	-24%	-28%

Legenda:
>15%
5% a 15%
-5% a 5%
-15 a -5%
< -15%

De modo geral, os fluxos máximos estimados na pesquisa de Demarchi [2000] foram menores que os fluxos apresentados nesta pesquisa, apresentando as maiores reduções nos greides acentuados de 6% e 8%. Desta forma, a estimativa do nível de serviço usando-se os fluxos de serviços apresentados por Demarchi [2000] tende a ser pior do que usando os determinados nesta pesquisa, com base na densidade.

8.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou equivalentes veiculares determinados para rodovias paulistas de pista dupla, com duas faixas de tráfego, considerando-se duas medidas de desempenho:

velocidade dos automóveis e densidade. Foram apresentados os valores dos equivalentes para diferentes comprimentos de rampa, magnitudes de greides, porcentagens de caminhões, níveis de serviço e velocidade de fluxo livre (FFS), para as duas medidas. Para fins práticos, foram apresentadas tabelas de fluxos máximos para cada medida de desempenho investigada.

Quanto à medida de desempenho, concluiu-se que o uso da velocidade dos automóveis implica em equivalentes veiculares que indicam maiores impactos do caminhão na corrente de tráfego do que a densidade. Conseqüentemente, o uso desses maiores fatores de equivalência resultam em estimar piores níveis de serviço. Deste modo, recomenda-se que a densidade seja considerada no cálculo de equivalentes veiculares para rodovias paulistas de pista dupla, como verificado em estudos anteriores [Huber, 1982; Sumner *et al.*, 1984; Demarchi, 2000; TRB, 2000; Ingle, 2004].

Quanto ao nível de serviço, foram comparados os resultados obtidos utilizando os fatores de equivalência obtidos nesta pesquisa, na de Demarchi [2000] e do próprio HCM-2000, todos com base na densidade. O resultado mostrou que, para baixo fluxo de tráfego, o nível de serviço estimado não sofreu alteração nos três estudos; porém, para fluxos próximos à capacidade, os resultados dos níveis de serviço foram diferentes em cada estudo. Não se sabe, contudo, qual dos resultados representa fielmente as condições analisadas, sendo desejável que sejam realizadas investigações sobre a percepção do usuário quanto ao nível de operação da rodovia.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A meta desta pesquisa de mestrado foi avaliar a implicação do uso de medidas de desempenho distintas no cálculo fatores de equivalência para caminhões típicos em rodovias de pista dupla no estado de São Paulo. Para atingir esta meta, foram definidos três objetivos:

- Caracterizar a composição típica do tráfego e estudar o desempenho de caminhões em rodovias paulistas de pista dupla do Estado de São Paulo;
- Recalibrar o modelo de simulação CORSIM; e
- Calcular fatores de equivalência para caminhões (E_T);

A meta e os objetivos propostos para esta pesquisa foram plenamente atingidos, uma vez que os três objetivos propostos foram alcançados. A seguir são apresentadas as conclusões obtidas para cada objetivo proposto.

9.1. CONCLUSÕES

Quanto ao primeiro objetivo, a caracterização da composição típica e desempenho dos caminhões em rodovias de pista dupla do estado de São Paulo, podem ser tecidas diversas conclusões, a primeira das quais é que o método proposto para obtenção do dia útil típico foi capaz de caracterizar, de forma satisfatória, o tráfego veicular que é tipicamente observado em rodovias paulistas de pista dupla. A partir destes resultados, determinou-se que os fatores de equivalência devem ser calculados para porcentagens de caminhões no tráfego de até 60%, já que foram observadas porcentagens de caminhões desta ordem em dias típicos.

Pode-se também constatar que, nos últimos anos, houve um crescimento no tráfego de combinações de veículos de cargas (CVCs), veículos com maior número de eixos e maior capacidade de carga. A participação destes veículos no tráfego de rodovias de pista dupla do

estado de São Paulo passou de menos de 0,3%, em 2000, para 3,9% da amostra observada nesta pesquisa; em rodovias de pista simples, a participação de CVCs no tráfego em 2005 foi de 10%. Este aumento significativo pode ser atribuído à Resolução 164/2004 [CONTRAN, 2004], que dispensa o porte de Autorização Especial de Trânsito (AET) para combinações de veículos de carga de 45 a 57 toneladas.

Além do aumento da participação dos veículos maiores e mais pesados no tráfego, pode-se também notar que, de modo geral, a relação massa/potência dos caminhões paulistas apresentou uma pequena melhora, comparada com os resultados do estudo realizado por Demarchi [2000]. Esta melhora pode ser atribuída ao aumento da potência dos motores dos caminhões mais novos, já que não houve grande alteração na distribuição da massa total dos veículos. Embora esta conclusão não possa ser aplicada em trechos onde a fiscalização por balanças seja inexistente ou esporádica, parece existir certa tendência de redução da relação massa/potência dos caminhões; fato esse exemplificado pela relação massa/potência média da amostra obtida em rodovias paulistas de pista dupla (105 kg/kW), bem próxima ao valor do caminhão típico adotado pelo HCM-2000 (100 kg/kW) para rodovias similares nos EUA.

Quanto à frota típica de caminhões em rodovias de pista simples e dupla do estado de São Paulo, constatou-se que a frequência dos caminhões mais longos foi mais expressiva em rodovias de pista simples, enquanto os caminhões menores (dois a quatro eixos) tiveram maior participação no tráfego em rodovias de pista dupla.

Quanto ao segundo objetivo, recalibração do CORSIM, esta pesquisa propôs um método para a calibração dos parâmetros de aceleração dos caminhões usando algoritmo genético, uma vez que a literatura pesquisada não reporta a calibração do modelo de desempenho do CORSIM. Os resultados da calibração do modelo de desempenho pela calibração foram satisfatórios, tendo-se obtido erros médios de 5%, significativamente menores que os erros médios obtidos em simulações com os valores *default* para os parâmetros de desempenho, que

foram da ordem de 15%. A recalibração do CORSIM também envolveu os parâmetros da lógica de *car-following*, para o qual foi usado um algoritmo genético criado por Araújo [2007]. A versão recalibrada do modelo, com novos parâmetros para o desempenho veicular e a lógica de *car-following*, apresentou erros médios de 6,32% para a calibração e 6,58% na validação, considerada adequada para uso nas pesquisas envolvidas.

Do terceiro objetivo pode-se concluir que os fatores de equivalência para caminhões determinados com base na velocidade dos automóveis como medida de desempenho corroboram o que apresentam a literatura: os equivalentes aumentam com a inclinação do greide e o comprimento da rampa; porém, ao contrário do que Huber [1982] demonstrou, os equivalentes veiculares não são constantes com aumento do fluxo de tráfego e a porcentagem de caminhões, de modo geral, decrescem. Concluiu-se também que a adoção da velocidade dos automóveis como medida de desempenho implica em equivalentes que indicam maiores impactos dos caminhões na corrente de tráfego. Desta forma, a estimativa do nível de serviço usando os equivalentes baseados na velocidade dos automóveis foi pior do que utilizando os equivalentes baseados na densidade.

A opção da densidade como medida de desempenho revelou ser válida para o propósito de análise de nível de serviço em rodovias paulistas de pista dupla. Por melhor representar a proximidade dos veículos, a densidade é menos sensível que a velocidade dos automóveis às alterações das condições básicas (geometria da via e condições do tráfego), proporcionando maiores fluxos de serviço.

9.2. RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou resultados e conclusões que complementam as sugestões de Demarchi [2000] sobre impacto de caminhões em rodovias de pista dupla. No entanto, os resultados apresentados não esgotam a necessidade de pesquisas futuras sobre o assunto.

Pelo fato de o tráfego de CVCs ter crescido em 4% entre 2000 e 2007, sugere-se que a

composição de caminhões no tráfego veicular seja constantemente atualizada, por meio de dados representativos da população de caminhões, principalmente de CVCs. Recomenda-se que as coletas sejam realizadas, principalmente, em balanças móveis onde a fiscalização é esporádica.

Sugere-se também que a calibração do modelo de simulação – neste caso, o CORSIM – seja atualizada constantemente, haja vista a variação da composição típica de caminhões. Para a recalibração dos parâmetros de desempenho dos caminhões, recomenda-se utilizar uma amostra que seja proporcional à distribuição da composição típica da frota observada nas rodovias.

Com o propósito de adaptar o manual de capacidade rodoviária para as condições de rodovias brasileiras, sugere-se que, além das curvas básicas criadas nesta pesquisa para velocidades de fluxo livre (FFS) de 110 km/h e 100 km/h, outras curvas básicas, tais como 120 km/h, 90 km/h e 80 km/h, sejam criadas para representar as velocidades mais comuns na maioria das rodovias de pista dupla do estado de São Paulo.

Os equivalentes veiculares desta pesquisa foram determinados para rodovias com duas faixas de tráfego. Seria interessante verificar se estes fatores de equivalência podem ser usados em rodovias com maior número de faixas.

Recomenda-se também verificar o quão fiel o nível de serviço estimado pelo uso dos equivalentes obtidos por cada método (e para cada medida de desempenho) representa uma condição real conhecida. Dados obtidos de sensores de tráfego, como velocidade dos veículos e contagem de tráfego classificada, podem apresentar as condições de operação observadas em um trecho da rodovia. Seria mais interessante identificar qual o nível de serviço na rodovia de acordo com a percepção do usuário e relacionar isso com os níveis de serviços estimados em cada método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1994) **A policy on geometric design of rural highway**. American Association of State Highway Officials, Washington, D.C.
- AL-KAISY, A.; HALL, F. L.; REISMAN, E. S. (2002) Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow. **Transportation Research Part A**, v. 36-A, p. 725-742.
- AL-KAISY, A.; JUNG, Y.; RAKHA, H. (2005) Developing passenger car equivalents for heavy vehicles during congestion. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, p. 514-523, jul.
- ARAÚJO, J. J. (2007) **Estudo do impacto de veículos pesados sobre a infra-estrutura rodoviária através de simulação microscópica de tráfego**. 154p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ARCHILLA, A. R.; DE CIEZA, A. O. F. (1996) Truck performance on Argentinean highway. **Transportation Research Record 1555**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 114-123.
- BANKS, J.; CARSON, J. S. (1984) **Discrete-event system simulation**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- BESTER, C. J. (2000) Truck speed profile. **Transportation Research Record 1701**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 111-115.
- BLOOMBERG, L.; DALE, J. (2000) Comparasion of VISSIM and CORSIM traffic simulation models on a congested network. **Transportation Research Record 1727**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 52-60.
- BRILON, W.; BRESSLER, A. (2004) Traffic flow on freeway upgrades. **Transportation Research Record 1883**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 112-121.
- CHEU, R.; JIN, X.; NG, K.; NG, Y.; SRINIVASAN, D. (1998) Calibration of FRESIM for Singapore expressway using genetic algorithm. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, p. 526-535, dez.
- CHUNDURY, S. E B. WOLSHON (2000) Evaluation of CORSIM car-following model using global position system field data. **Transportation Research Record 1710**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 114-121.
- CNT (2005) **Boletim Estatístico CNT 2005**. Confederação Nacional dos Transportes. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/informacoes/pesquisas_bol_estatistico.asp>. Acesso em: 8 de fev.2006.
- CONTRAN (1998) **Resolução 68/98: Requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículo de Carga**. Conselho Nacional de Trânsito, Ministério da Justiça do Brasil, Brasília, DF.

- CONTRAN (2004) **Resolução 164/04: Acresce parágrafo único ao artigo 1º da Resolução CONTRAN nº 68/98**. Conselho Nacional de Trânsito, Ministério da Justiça do Brasil, Brasília, DF.
- CRAUS, J.; POLUS, A.; GRINBERG, I. (1980) A revised method for the determination of passenger car equivalencies. **Transportation Research Part A**, v. 14-A, p. 241-246.
- CUNAGIN, W. D.; CHANG, E. C. (1982) Effects of trucks on freeway vehicle headways under off-peak flow conditions. **Transportation Research Record 869**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 54-59.
- CUNAGIN, W. D.; MESSER, C. J. (1983) Passenger-car equivalents for rural highways. **Transportation Research Record 905**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 61-68.
- DEMARCHI, S. H. (1995) **Influência de veículos pesados na capacidade de interseções rodoviárias**. 164p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DEMARCHI, S. H. (2000) **Influência dos veículos pesados na capacidade e nível de serviço de rodovias de pista dupla**. 166p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DEMARCHI, S. H.; PIERIN, I. (2001) Impacto da sobrecarga no desempenho de caminhões canavieiros em rampas ascendentes. **Transporte em Transformação VI** – Trabalhos Vencedores do Prêmio CNT Produção Acadêmica 2001, p. 91-107.
- DEMARCHI, S. H.; SETTI, J. R. A. (2003) Limitations of passenger-car equivalents derivation for traffic streams with more than one truck type. **Transportation Research Record 1852**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p. 96-104.
- DER-SP (1997) **Edital de Licitação No. 007/CIC/97 – Lote 01: Sistema Rodoviário Anhangüera-Bandeirantes**. Disponível em: <http://www.artesp.sp.gov.br/download/editais/edital_lote01_autoban.pdf>. Acesso em: 18 out.2005.
- DER-SP (2005) **Estatística de tráfego - 2005**. Departamento de Estradas de Rodagem. Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/malha/estatisticas_trafego/estat_trafego/comercial.aspx>. Acesso em: 7 abr. 2006.
- DHULIPALA, S. H. (2002) **A system for travel time estimation on urban freeways**. 115p. Dissertação (mestrado) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. Disponível em: < <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-06052002-154359/unrestricted/dhulipala.pdf> >. Acesso em: 18 jun.2006.
- DNER (1977) **Pesquisa de capacidade de rodovias**. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. Rio de Janeiro. (Citado por Melo [2002])
- DNER (1979) **Instruções para Implantação de Terceiras Faixas**. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem. Rio de Janeiro.

- DNIT (2006) **Manual de estudos de tráfego**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.
- EGAMI, C. Y.; SETTI, J. R. A.; RILETT, L. R. (2004) Algoritmo genético para calibração automática de um simulador de tráfego em rodovias de pista simples. **Transportes**, Rio de Janeiro, v.12, n.2, p.5-14.
- EGAMI, C. Y. (2006) **Adaptação do HCM-2000 para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil**. 233p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ELEFTERIADOU, L.; TORBIC, D.; WEBSTER, N. (1997) Development of passenger car equivalents for freeways, two-lane highways, and arterials. **Transportation Research Record 1572**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.51-58.
- FAN, H. S. L. (1990) Passenger car equivalents for vehicles on Singapore expressway. **Transportation Research Part A**, v. 24-A, n.5, p.391-396.
- FANCHER, P. (1983) Vehicle acceleration characteristics including highway design. **NCHRP Interim Report**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. maio, 1983, 88p.
- FHWA (2001) CORSIM user's guide. **Federal Highway Administration**, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- GOMES, G. Z. (2004) **Uso de microssimulação na avaliação da sustentabilidade de corredores rodoviários**. 103p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HALATI, A.; LIEU, H.; WLAKER, S. (1997) CORSIM – Corridor traffic simulation model. In: TRAFFIC CONGESTION AND TRAFFIC SAFETY IN THE 21st CENTURY: Challenges, Innovations and Opportunities, 1997, Chicago. **Proceedings...** Chicago: American Society of Civil Engineering, p.570-576.
- HELLINGA, B. R. (1998) Requirements for the calibration of traffic simulations models. In: PROCEEDINGS OF ANNUAL CONFERENCE, 1998, Halifax. **Proceedings...** Halifax: Canadian Society for Civil Engineering, v.4b, p.221-222. Disponível em: <<http://gorge.uwaterloo.ca/bhellings/publications%20Page/Conference.htm>>. Acesso em: 8 abr. 2006.
- HENDERSON, J. (2004) Application of genetic algorithm in transportation engineering. In: 83rd ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2004, Washington. **Proceedings...** 1 CD-ROM.
- HRB (1965) **Highway Capacity Manual**. Highway Research Board, Transportation Research Council, Washington, D.C.
- HUBER, M. J. (1982) Estimation of passenger-car equivalents of trucks in traffic stream. **Transportation Research Record 869**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.60-70.

- HUFF, T. S.; SCRIVNER, F. H. (1955) Simplified climbing-lane design theory and road tests results. **HRB Bulletin 104**. Highway Research Board, Washington, D.C., p.1-11.
- HUTTON, T. D. (1970) Acceleration performance of highway diesel trucks. **SAE paper 700664**. Society of Automotive Engineers, New York, NY.
- INGLE, A. (2004) **Development of passenger car equivalent for basic freeway segments**. 122p. Dissertação (mestrado) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. Disponível em: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd07102004112810/unrestricted/passenger_car_equivalents_ingle.pdf>. Acesso em: 10 mar.2006.
- KABBACH, F. I. J. (1992) **Contribuição para o estudo de implantação de faixas adicionais em rampas ascendentes de rodovias de pista simples**. 333p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- KIM, K.; RILLET, L. R. (2001) Genetic-algorithm-based approach for calibration microscopic simulation models. In: IEEE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM CONFERENCE, 2001, Oakland. **Proceedings...** 1 CD-ROM.
- KRAMMES, R. A. (1985) **Effect of trucks on the capacity of level, basic freeways segments**. Tese (Doutorado) – Pennsylvania State University, University Park, Pa. (Citado por Krammes e Crowley [1986])
- KRAMMES, R. A.; CROWLEY, K. W. (1986) Passenger car equivalents for trucks on level freeway segments. **Transportation Research Record 1091**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.10-17.
- LINZER, E. M.; ROESS, R. P.; MCSHANE, W. R. (1979) Effect of trucks, buses, and recreational vehicles on freeway capacity and service volume. **Transportation Research Record 699**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.17-25.
- MA, T.; ABDULHAI, B. (2002) Genetic algorithm-based optimization approach and generic tools for calibrating traffic microscopic simulation parameters. **Transportation Research Record 1800**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.6-15.
- MACHADO NETO, E. F. (1995) **Influência de veículos pesados na capacidade de rodovias de pista simples**. 136p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MELO, R. A. (2002) **Faixas adicionais para aclusivos de rodovias de brasileiras**. 178p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MILAM, R. T. E F. CHOA (2002) **Recommended guidelines for the calibration and validation of traffic simulation models**. Disponível em : <http://transportation.ky.gov/planning/traffic/traffic_files/CORSIM%20Validation.pdf#search=%22%22recommended%20guidelines%20for%20the%20calibration%20and%20validation%22%22>. Acesso em: 9 set.2006.

- OWEN, L. E.; ZHANG, Y.; RAO, L.; MC HALE, G. (2000) Traffic flow simulation using corsim. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando: INFORMS Simulation Society, p. 1143-1147.
- PAYNE, H. J.; THOMPSON, S.; CHANG, S. (1997) Calibration of FRESIM to achieve desired capabilities. **Transportation Research Record 1591**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.23-30.
- RAKHA, H.; DEMARCHI, S. H.; SETTI, J.; VAN AERDE, M. (2001) Vehicle dynamics model for predicting maximum truck accelerations. **Journal of Transportation Engineering**, v.127(5), p. 418-425, out.
- RAKHA, H.; CROWTHER, B. (2002) Comparasion of Greenshields, Pipes and Van Aerde car-following and traffic stream models. **Transportation Research Record 1802**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.248-262.
- RAKHA, H.; LUCIC, I. (2002) Variable power vehicle dynamics model for estimation maximum truck acceleration levels. **Journal of Transportation Engineering**, v.128(5), p. 412-419, set/out.
- RAKHA, H.; CROWTHER, B. (2003) Comparasion and calibration of FRESIM and INTEGRATION steady-state car-following behavior. **Transportation Research Part A**, v.37-A, n.1, p. 1-27, jan.
- RAKHA, H.; YU, B. (2004) Truck performance curves reflective of truck and pavement characteristics. **Journal of Transportation Engineering**, v.130(6), p. 753-767, nov/dez.
- RAKHA, H.; YU, B. (2005) Impacto of tire and aerodynamic aids on truck performance along upgrade sections. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 84th ANNUAL MEETING. Washington, D.C. **Proceedings...** 1 CD-ROM.
- REILLY, E. F.; SEIFERT, J. (1969) Truck Equivalency. **Highway Research Record**, n.28, p. 25-37.
- ROESS, R. P. (1984) Level of Service Concepts: Development, Philosophies, and Implications. **Transportation Research Record 971**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.1-6.
- ROESS, R. P.; LINZER, E. M.; MC SHANE, W. R.; PIGNATARO, L. J. (1980) Freeway Capacity Procedures. In: **Transportation Research Circular 212**: Interim Materials on Highway Capacity, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 276 p.
- ROESS, R. P.; MESSER, C. J. (1984) Passenger Car Equivalents for Uninterrupted Flow: Revision of Circular 212 Values. **Transportation Research Record 971**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.7-13.
- ROESS, R. P.; ULERIO J. M. (1997) Comparasion of the 1994 HCM ramp analysis procedures and the FRESIM model. **NCHRP Report 385**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

- SAAL, C. C. (1941) Hill-climbing ability of motor trucks. **Highway Research Board Proceedings**, v.21, p.393-407. (Citado por Demarchi [2000])
- SCHULTZ, G. G.; RILLET, L. R. (2004) An analysis of the distribution and calibration of car-following sensitivity parameters in microscopic traffic simulation models. In: 83rd ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2004, Washington. **Proceedings...** 1 CD-ROM.
- SCHWENDER, H. C.; Norman, O. K.; Granum, J. O. (1957) New method of capacity determination for rural roads n mountainous terrain. **HRB Bulletin 167**, Highway Research Board, Washington, D.C., p.10-37.
- SECRETARIA DE TRANSPORTES DO ESTADO DE SÃO PAULO (2005) **Boletim estatístico 2005**. Governo do Estado de São Paulo, 113 p. Disponível em: <<http://www.transportes.sp.gov.br/v20/boletim.asp>>. Acesso em 21 jan.2006.
- SETTI, J. R. (1997) **Capacidade e nível de serviço de rodovias de pista simples**. 117p. Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SILVEIRA, A. (1974) **Considerações sobre a influência dos caminhões nos greides em rampa na capacidade das rodovias**. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ST. JOHN, A. D. (1976) Nonlinear truck factor for two-lane highways. **Transportation Research Record 615**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.49-53.
- ST. JOHN, A. D.; GLAUZ, D. (1976) Speeds and service on multilane upgrades. **Transportation Research Record 615**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, p.4-9.
- ST. JOHN, A. D.; KOBETT, D. R. (1978) Grade effects on traffic flow stability and capacity. **NCHRP Report 185**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 110p.
- SUMNER, R.; HILL, D.; SHAPIRO, S. (1984) Segment passenger car equivalent values for cost allocation on urban arterial roads. **Transportation Research Part A**, v.18-A, n.5/6, p. 399-406.
- TARAGIN, A. (1945) Effect of length of grade on speed of motor vehicle. **Highway Research Board Proceedings**, v.25, p. 342-353.
- TOLEDO, T.; KOUTSOPOULOS, H. (2004) Statistical validation of traffic simulation models. In: 83rd ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2004, Washington. **Proceedings...** 1 CD-ROM.
- TRB (1985) **Highway Capacity Manual**, Special Report 209. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA, 3^a ed.
- TRB (1997) Metric Analysis Reference Guide – Supplement to 1997 update of Special Report 209, Highway Capacity Manual. **Transportation Research Circular 489**.

Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA
(Citado por Demarchi [2000])

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

WEBSTER, N.; ELEFTERIADOU, L. (1999) A simulation study of truck passenger car equivalents on basic freeway sections. **Transportation Research Part B**, v.33-B, p. 323-336.

WICKS; D. A.; LIEBERMAN, E. B. (1977) Development and testing of INTRANS, a microscopic freeway simulation model, v.1, **FHWA**: US Department of Transportation. (Citado por Halati *et al.* [1997])

WIDMER, J. A. (2004) Proposta de nomenclatura de caminhões. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2004, Florianópolis. **Anais...** Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, v.1, p.624-635.

WILEY, W. E. (1949) Survey of uphill speeds of trucks on mountain grades. In: **Proceedings of HRB**, Highway Research Board, Washington, D.C., v. 29, p. 304-310. (Citado por Demarchi [2000])

WRIGHT, J. M.; TIGNOR, S. C. (1965) Relationship between gross weights and horsepower of commercial vehicle operating on public roads. **SAE Transportation**, v.73. (Citado por St. John e Glauz [1976]).

APÊNDICE A. VOLUME DE TRÁFEGO NO DIA TÍPICO

Esta seção apresenta os resultados dos volumes de tráfego obtidos para as 17 praças de pedágio estudadas a partir da aplicação do método do dia útil típico, proposto no capítulo 5.

A.1. RODOVIA WASHINGTON LUIZ (SP-310)

Figura A.10: Dia típico na SP-310 km 181 (praças Rio Claro e Itirapina)

Figura A.11: Dia típico na SP-310 km 282 (praça Araraquara)

Figura A.12: Dia típico na SP-310 km 346 (praça Agulha)

Figura A.13: Dia típico na SP-310 km 398 (praça Catiguá)

A.2. VIA ANHANGÜERA (SP-330)

Figura A.14: Dia típico na SP-330 km 26 (praça Perus)

Figura A.15: Dia típico na SP-330 km 82 (praça Valinhos)

Figura A.16: Dia típico na SP-330 km 118 (praça Nova Odessa)

Figura A.17: Dia típico na SP-330 km 152 (praça Limeira-A)

Figura A.18: Dia típico na SP-330 km 168 (praça Leme)

Figura A.19: Dia típico na SP-330 km 215 (praça Pirassununga)

Figura A.20: Dia típico na SP-330 km 281 (praça São Simão)

Figura A.21: Dia típico na SP-330 km 350 (praça Sales de Oliveira)

Figura A.22: Dia típico na SP-330 km 405 (praça Ituverava)

A.3. RODOVIA DOS BANDEIRANTES (SP-348)

Figura A.23: Dia típico na SP-348 km 36 (praça Campo Limpo)

Figura A.24: Dia típico na SP-348 km 77 (praça Itupeva)

Figura A.25: Dia típico na SP-348 km 115 (praça Sumaré)

Figura A.26: Dia típico na SP-348 km 159 (praça Limeira-B)

APÊNDICE B. O ARQUIVO TSD DO CORSIM

Esta seção está dividida em duas partes: a primeira apresenta a estrutura do arquivo binário *Time Step Data* (TSD) e a segunda o programa desenvolvido em *Visual Basic for Application* (VBA), em planilha Excel, para extrair os dados dos veículos no arquivo TSD, com base no trabalho de Dhulipala [2002].

B.1. ESTRUTURA DO ARQUIVO TSD

Após a simulação do arquivo TRF, um dos resultados gerados pelo CORSIM é o arquivo binário TSD o qual contém o relatório dos veículos que trafegaram na rede a cada segundo de simulação. Os dados contidos no TSD são lidos de acordo com o tamanho de cada parâmetro. No VBA, a variável do tipo *Long* lê dados de 4 bytes; a do tipo *Integer* lê dados de 2 bytes; e do tipo *Byte* lê dados de 1 byte.

Ao iniciar a leitura do TSD, os primeiros 16 bytes representam o cabeçalho do arquivo. Em seguida, 28 bytes apresentam características da simulação e por fim 6 bytes descrevem o *link* (tramo simulado). A Tabela B.1 apresenta os parâmetros do cabeçalho.

Tabela B.1: Dados do cabeçalho do arquivo TSD.

Campo	Tamanho (bytes)	Descrição
<i>Message Name</i>	4	LG_DATA_GP = 3001
<i>Message Lenght</i>	4	Comprimento em bytes deste arquivo, excluindo os três primeiros parâmetros
<i>Simulation Time</i>	4	Tempo em segundos da simulação
<i>Request Type</i>	4	DR_TS_VEHICLE = 14000
<i>Simulation Attributes</i>	28	Parâmetros da simulação
<i>Instance ID</i>	4	ID do <i>link</i> contendo veículos
<i>Instance ID Count</i>	2	Número de veículos no <i>link</i>

O primeiro campo *Message Name* corresponde ao tipo de listagem dos dados de resultados, assumindo os seguintes valores: 3001 para os dados detalhados a cada segundo e

3003 para o resumo dos resultados. Nesta pesquisa, foram utilizados os dados detalhados. O terceiro campo *Request Type* representa o tipo de dado a ser extraído, sendo: 13000 para dados dos *links*; 14400 para dados de incidentes; 14300 para os dados dos acessos (*ramp meter*); 14200 para os dados dos semáforos; e 14000 para os dados dos veículos. Nesta pesquisa, foram obtidos os dados dos veículos. O campo *Instance ID* indica o número do *link* atual (*LinkID*). A numeração de cada *link* é função do número do nó anterior (*up-stream node* – *USN*) e do nó posterior (*down-stream node* – *DSN*), dada pela seguinte equação:

$$LinkID = USN \cdot 10000 + DSN \quad (B.1)$$

Após a leitura do cabeçalho, os próximos bytes do TSD descrevem as características dos veículos. Essas características correspondem a 18 parâmetros, totalizando 32 bytes a cada segundo de simulação. A Tabela B.2 relata esses parâmetros [FHWA, 2001].

Tabela B.2: Características dos veículos no arquivo TSD.

Campo	Tamanho (bytes)	Descrição
<i>Global vehicle ID</i>	4	ID do veículo
<i>Fleet</i>	1	0 = automóvel; 1 = caminhão; 2= <i>carpool</i> ; 3= ônibus
<i>Vehicle Type</i>	1	1-2 = automóvel (baixo e alto desempenho); 3-6 = caminhões (leve, médio, pesado e extrapesado); 7 = ônibus; e 8-9 = <i>carpool</i> (baixo e alto desempenho).
<i>Vehicle Length</i>	1	Comprimento do veículo (ft)
<i>Driver Type</i>	1	Tipo do motorista (1 a 10)
<i>LaneID</i>	1	Número da faixa que o veículo trafega
<i>Vehicle Position</i>	4	Distância do nó anterior ao veículo (ft)
<i>Previous USN</i>	2	ID do nó anterior ao link que o veículo trafega
<i>Turn Code</i>	1	0= esquerda; 1= reto; 2= direita; 3= diagonal esquerda; 4= diagonal direita
<i>Queue Status</i>	1	0= não está em fila; 1= veículo em fila
<i>Acceleration</i>	1	Aceleração instantânea do veículo (ft/s ²)
<i>Velocity</i>	1	Velocidade instantânea do veículo (ft/s)
<i>Lane Change Status</i>	1	0= veículo não deseja mudar de faixa; 1= veículo deseja mudar de faixa.
<i>Target Lane</i>	1	ID da faixa que o veículo gostaria de ocupar
<i>Destination Node</i>	2	ID do nó de destino do veículo
<i>Leader Vehicle ID</i>	4	ID do veículo líder
<i>Follower Vehicle ID</i>	4	ID do veículo seguidor
<i>Previous Lane ID</i>	1	ID da faixa que o veículo está ocupando

B.2. PROGRAMA PARA EXTRAIR OS DADOS DO ARQUIVO TSD

O programa foi escrito em VBA (*Visual Basic for Application*) dentro do Microsoft Excel e está dividido em três sub-rotinas: a primeira *Read_File* é a principal, em que se inicia o programa e abre o arquivo TSD para a leitura; a segunda *Write_Title* escreve os títulos de cada campo extraído do arquivo TSD; e a terceira *Write_Data* escreve na planilha do Excel os dados dos veículos obtidos no arquivo TSD a cada segundo da simulação.

Antes de executar o programa, devem estar especificados nas células B4 e B5 os nós do tramo a ser extraído os dados: nó anterior (*up node*) na célula B4 e nó posterior (*down node*) na célula B5. Ao iniciar o programa, uma caixa de diálogo é aberta para seleção do arquivo TSD que contém os dados para serem extraídos. A seguir, é apresentado o código do programa.

B.2.1. Código do programa

Sub **Read_File()**

```
Dim TSD As String, Lelinha As String, i As Integer, LinkID as Long
Dim msg_name As Long, msg_length As Long, sim_time As Long, request_type As Long
Dim ID As Long, ID_count As Integer, Veh_data(1 To 18) As Long
Dim veh_id As Long, fleet As Byte, veh_type As Byte, veh_len As Byte, dr_type As Byte
Dim lane_id As Byte, veh_pos As Long, prev_usn As Integer, turn_code As Byte
Dim queue_st as Byte, acc As Byte, vel As Byte, lane_change As Byte
Dim target_lane As Byte, dest_node As Integer
Dim lead_veh_id As Long, foll_veh_id As Long, prev_lane_id As Byte
```

```
TSD = Application.GetOpenFilename("Arquivos TSD, *.tsd")
ActiveSheet.Range("B8:V65536,I3,I4").Clear
LinkID = ActiveSheet.Range("B4") * 10000 + ActiveSheet.Range("B5")
```

```
Call Write_Title
```

```
Open TSD For Binary As #3
```

```
Seek #3, 17
```

```
Do Until Loc(3) = LOF(3)
```

```
    ' Lê o cabeçalho: Message Info
```

```
    Get #3, , msg_name
```

```
    Get #3, , msg_length
```

```
    Get #3, , sim_time
```

```
    Get #3, , request_type
```

```

If (msg_name = 3001) And (request_type = 14000) Then
  ' Compara se os dados são do tipo veículos: Vehicle Info
  Seek #3, Loc(3) + 29
  Get #3, , ID
  Get #3, , ID_count

  If ID = LinkID Then
    For i = 0 To ID_count - 1
      ' Lê os dados: Vehicle Message
      Get #3, , veh_id
      Get #3, , fleet
      Get #3, , veh_type
      Get #3, , veh_len
      Get #3, , dr_type
      Get #3, , lane_id
      Get #3, , veh_pos
      Get #3, , prev_usn
      Get #3, , turn_code
      Get #3, , queue_st
      Get #3, , acc
      Get #3, , vel
      Get #3, , lane_change
      Get #3, , target_lane
      Get #3, , dest_node
      Get #3, , lead_veh_id
      Get #3, , foll_veh_id
      Get #3, , prev_lane_id

      Veh_data(1) = veh_id
      Veh_data(2) = fleet
      Veh_data(3) = veh_type
      Veh_data(4) = veh_len
      Veh_data(5) = dr_type
      Veh_data(6) = lane_id
      Veh_data(7) = CLng(veh_pos)
      Veh_data(8) = prev_usn
      Veh_data(9) = turn_code
      Veh_data(10) = queue_st
      Veh_data(11) = acc
      Veh_data(12) = vel
      Veh_data(13) = lane_change
      Veh_data(14) = target_lane
      Veh_data(15) = dest_node
      Veh_data(16) = lead_veh_id
      Veh_data(17) = foll_veh_id
      Veh_data(18) = prev_lane_id

      Write_Data (sim_time)
    Next i
  End If
End If

```

```

Else
    Seek #3, Loc(3) + (msg_length - 37)
End If
Else
    Seek #3, Loc(3) + msg_length - 3
End If
Loop
Close #3
End Sub

```

Sub **Write_Title** ()

```

ActiveSheet.Range("B6:V6") = Array("Time", "UpNode", "DnNode", "VehID", _
    "Fleet", "VehType", "Veh Len", "DrType", "LaneID", "VehPos", "Previous USN", _
    "Turn Code", "Queue Status", "Accel", "Speed", "Lane Change", "Target Lane", _
    "Dest Node", "LeaderID", "FollowerID", "Previous Lane")
ActiveSheet.Range("B6:V6").Font.Bold = True
End Sub

```

Sub **Write_Data** (clock As Long)

```

Dim ulinha As Long, col As Integer, j As Integer

ulinha = Activsheet.Range("C65536").End(xlUp).Row + 1

Activsheet.Cells(ulinha, 2) = clock + 1
Activsheet.Cells(ulinha, 3) = Int(ID / 10000)
Activsheet.Cells(ulinha, 4) = ID - Int(ID / 10000) * 10000

col = 4
For j = 1 To 18
    Activsheet.Cells(ulinha, col + j) = Veh_data(j)
Next j
End Sub

```