

Adaptação do HCM2000 para rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil

Cíntia Yumiko Egami¹; José Reynaldo Setti²

Resumo: Este artigo apresenta uma adaptação do procedimento para análise do nível de serviço e capacidade proposto pelo HCM2000 para rodovias de pista simples no Brasil, realizada a partir da hipótese de que os resultados obtidos seriam melhores se o método fosse adaptado para condições típicas locais. A adaptação consistiu em obter novos valores para os seguintes fatores de ajuste usados no HCM2000: fator de pico horário (*PHF*); fator de ajuste para o efeito de rampas (*f_G*); fator de equivalência veicular (*E_T*); fator de ajuste para zonas de ultrapassagem proibida na velocidade média de percurso (*f_{np}*) e fator de ajuste para o efeito combinado da distribuição direcional do tráfego e da porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida na porcentagem de tempo viajando em pelotões (*f_{dnp}*). Os novos valores foram obtidos a partir de simulações realizadas com uma versão do modelo TRARR calibrada para representar uma rodovia típica do Brasil. A calibração do TRARR foi realizada empregando-se um algoritmo genético. Como os valores encontrados para os fatores escolhidos, à exceção do PHF, são diferentes dos fornecidos no HCM2000, sugere-se que passem a ser usados na determinação da capacidade e nível de serviço em rodovias no Brasil no lugar daqueles empregados no HCM.

Abstract: This paper presents an adaptation of the HCM2000 procedures for the estimation of level of service and capacity of two-lane rural highways in Brazil, based on the assumption that the estimates would be better if the procedure were adapted to the local conditions. This adaptation consisted in finding new values for the following factors that are used in the HCM2000: peak-hour factor (*PHF*), grade adjustment factor (*f_G*), passenger-car equivalents (*E_T*), adjustment for effect of no-passing zones on average travel speed on two-way segments (*f_{np}*) and adjustment for the combined effect of the directional distribution of traffic and of the percentage of no-passing-zones on percent time-spent-following (*f_{dnp}*). Values for these adjustment factors were obtained from a version of TRARR calibrated to represent a typical highway in Brazil. The model calibration was achieved using a genetic algorithm. As the new values, with the exception of PHF, were different from those given in the HCM2000, they should be adopted for the estimation of LOS and capacity for two-lane highways in Brazil.

1. INTRODUÇÃO

O *Highway Capacity Manual* (HCM) é um manual do *Transportation Research Board*, cuja primeira edição foi publicada nos Estados Unidos em 1950. Ao todo, foram publicadas quatro edições completas do HCM. A última delas, publicada em 2000 (TRB, 2000), tem 31 capítulos num volume contendo mais de mil páginas, além de uma versão digital em CD-ROM. O HCM fornece procedimentos para análise de nível de serviço de rodovias e de outros componentes do sistema viário.

Ainda que inicialmente o HCM tenha sido criado para ser usado somente nos Estados Unidos, os conceitos de capacidade e nível de serviço por ele propostos tiveram um grande impacto, de forma que, em consequência de sua importância, ele tornou-se a referência básica para a análise operacional de rodovias, tendo sido usado com pouca ou nenhuma adaptação no mundo todo (McLean, 1989; p. 41). Nas décadas de 1980 e 1990, entretanto, os resultados de alguns estudos sugerem que o uso direto da metodologia do

HCM pode não ser adequado para avaliar a qualidade de serviço de rodovias que não estejam localizadas nos Estados Unidos (ver: Yagar, 1983; Botma, 1986; Polus *et al.*; 1991; Botma e Fi; 1991; Brilon e Weiser, 1998; Luttinen, 2000).

Este artigo apresenta uma adaptação do procedimento para análise do nível de serviço proposto pelo HCM2000 (TRB, 2000) para rodovias de pista simples, sem faixas adicionais de subida, no Brasil. Esta adaptação foi realizada a partir da hipótese de que os resultados obtidos poderiam ser melhores se o método fosse adaptado para as condições encontradas no Brasil.

2. MÉTODO DE PESQUISA

Os estudos realizados para o desenvolvimento do capítulo 20 do HCM2000 estão descritos detalhadamente em Harwood *et al.* (1999). Resumidamente, esses estudos forneceram uma relação fluxo-velocidade para uma rodovia em condições ideais, e valores tabelados para fatores de ajuste que devem ser aplicados quando as condições da rodovia estudada não forem as ideais. Por condições ideais, entende-se uma rodovia sem restrições de ultrapassagem, sem interseções, localizada em região de relevo plano, com faixas de rolamento de 3,60 m de largura, acostamentos de 1,80 m de largura, tráfego dividido igualmente nas duas direções e composto apenas por automóveis. Nos estudos reali-

¹ **Cíntia Yumiko Egami**, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: cintiaye@gmail.com).

² **José Reynaldo Setti**, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: jrasetti@usp.br).

zados, foram obtidos fatores de ajuste para incorporar o efeito dos seguintes aspectos no nível de serviço e capacidade: (a) aclives no trecho estudado (f_g), (b) veículos pesados na corrente de tráfego (E_T), (c) trechos em que as ultrapassagens são proibidas; e (d) divisão direcional desigual do tráfego. Esses estudos foram realizados através de simulações, para as quais se usou uma versão do modelo TWOPAS, calibrada com dados coletados em rodovias localizadas nos EUA e no Canadá.

O método adotado para a adaptação do HCM2000 partiu do pressuposto que a estrutura geral do método deveria ser mantida e que apenas os parâmetros das equações e os valores tabelados dos fatores de ajuste deveriam ser recalculados para refletir as condições das rodovias no Brasil. Assim sendo, o método consistiu em obter uma versão de um simulador de rodovias de pista simples recalibrada, capaz de simular adequadamente uma rodovia típica no Brasil; e, através deste modelo, reproduzir os experimentos realizados no desenvolvimento do HCM2000, de forma a se obter novos valores para os fatores de ajuste e equações. Os fatores adaptados foram: fator de ajuste para o efeito de rampas f_g ; fator de equivalência veicular para caminhões e ônibus E_T ; fator de ajuste para efeito de zonas de ultrapassagem proibida na velocidade média de percurso f_{np} ; e fator de ajuste para o efeito combinado da distribuição direcional do tráfego e da porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida na porcentagem de tempo viajando em pelotões $f_{d/np}$.

Para as simulações, optou-se por utilizar o modelo TRARR, abreviação de *TRAffic on Rural Roads*, desenvolvido na Austrália pelo *ARRB Transport Research Ltd* (Hoban *et al.*, 1991). Embora seu desenvolvimento tenha sido interrompido, o TRARR é um modelo robusto, confiável e de execução rápida (Koorey, 2002; Botha *et al.*, 1993), qualidades desejáveis para o sistema automático de calibração adotado neste estudo. A opção pelo TRARR, em detrimento do TWOPAS (o modelo usado no desenvolvimento do HCM2000), foi feita devido ao fato do TRARR já ter sido objeto de estudo em uma pesquisa anterior (Egami, 2000). Esta decisão foi tomada unicamente em função do conhecimento profundo adquirido no uso do TRARR, já que o TRARR e TWOPAS são considerados equivalentes (Harwood *et al.*, 1999; Botha *et al.*, 1993).

3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

A calibração é o processo de ajuste dos valores dos parâmetros do modelo de simulação, usando dados observados em campo, para que ele possa representar realisticamente componentes específicos do sistema

modelado. A calibração é um processo iterativo em que os parâmetros do modelo são modificados até que os resultados produzidos pelo simulador fiquem o mais próximo possível dos dados de campo (Hourdakis *et al.*, 2003).

O processo adotado para a calibração do TRARR utiliza um algoritmo genético, um processo de busca baseado nos mecanismos da seleção natural e da genética que é particularmente eficiente para otimização de sistemas complexos como simuladores de tráfego. A calibração de parâmetros de simuladores de tráfego utilizando algoritmo genético já foi feita em Cingapura (Cheu *et al.*, 1998), nos Estados Unidos (Rilett e Kim, 2001; Kim e Rilett, 2001 e 2004) e Canadá (Ma e Abdulhai, 2001 e 2002). Nos processos de calibração, os dados coletados em campo são comparados com os resultados simulados para verificar o desempenho do algoritmo genético. O programa de calibração deste trabalho foi baseado no algoritmo desenvolvido por Rilett e Kim (2001) para a calibração do simulador TRANSIMS.

Para a calibração, foram selecionados parâmetros relacionados tanto ao comportamento dos motoristas como ao desempenho dos veículos. Os parâmetros comportamentais escolhidos para a calibração são quatro: *VHSFN* (*happy speed factor where there is no auxiliary lane*); *VOSFN* (*overtaking speed factor when there is no auxiliary lane*); *LAG* (*aggression number*) e *VMF* (*mean desired speed*). Os parâmetros do desempenho veicular usados na calibração são dois: *VNP* (*maximum power to be used while not overtaking*) e *VXP* (*maximum power to be used while overtaking*). Esses seis parâmetros foram escolhidos através de uma análise paramétrica, através da qual foram identificados os parâmetros cuja variação mais afeta os resultados das simulações. O objetivo do processo de calibração é encontrar os valores correspondentes a estes seis parâmetros que minimizem as diferenças entre uma corrente observada e a sua contrapartida simulada pelo TRARR.

O leitor interessado deve consultar Egami *et al.* (2004), para maiores detalhes sobre a calibração. No algoritmo genético, os valores dos seis parâmetros são transformados em binários e dispostos numa *string*, para formar um cromossomo de comprimento total de 444 bits. Usou-se uma população inicial de 100 cromossomos, cada um correspondendo a um conjunto de valores possíveis para os parâmetros de calibração. A probabilidade de *crossover* adotada foi 50%; a probabilidade de mutação, 30%. Dois critérios de parada foram usados para o algoritmo: número máximo de gerações (350) ou diferença mínima aceitável (2%). Esta diferença é calculada para cada cromossomo de acordo com a Equação (1) usando os resultados gerados pelo simulador e os valores observados em campo:

$$Diferença_r = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|OBS_i - SIM_i|}{OBS_i} \quad (1)$$

em que,

Diferença_r: comparação entre valor simulado e o observado da medida de desempenho *r* para a rodovia *r*;

OBS_i: valor observado da medida de desempenho *i*;

SIM_i: valor simulado da medida de desempenho *i* e

N: número de medidas de desempenho usadas.

Foram usadas duas medidas de desempenho para a calibração do modelo: a velocidade média de percurso e a porcentagem de veículos em pelotão (medida na entrada e na saída do trecho). Estas medidas de desempenho foram escolhidas porque, além de serem facilmente observadas em campo, estão diretamente ligadas aos resultados dos modelos que são usados na adaptação do HCM2000 para as rodovias estudadas.

O algoritmo genético usa uma função de ajuste (ou *fitness*) para avaliar o grau de adaptação de um cromossomo. Quanto maior o *fitness*, maior a probabilidade de o cromossomo ser selecionado para produzir descendentes que formam a geração seguinte. A função *fitness* usada é:

$$Fitness_I = A \cdot e^{-B \cdot (Diferença_I)} \quad (2)$$

em que,

Fitness_I: valor da função *fitness* para o cromossomo *I*;

A e *B*: constantes (*A* = 100, *B* = 5) e

Diferença_I: diferença calculada para o cromossomo *I* com a Equação 1.

Como o objetivo da calibração foi obter um simulador de uma rodovia “típica”, a calibração foi realizada usando-se simultaneamente cinco trechos de rodovias do interior do estado de São Paulo, cujas características foram consideradas suficientemente variadas e típicas das rodovias de pista simples da região. O conjunto de parâmetros encontrado ao final da calibração é o que fornece a menor diferença entre os fluxos simulados e os observados nos trechos estudados.

Os dados utilizados tanto na calibração quanto na validação do simulador foram coletados em cinco trechos de rodovias de pista simples localizados no estado de São Paulo. Os trechos selecionados estão listados na Tabela 1 e incluem tanto rodovias operadas por concessionárias (onde existe cobrança de pedágio) como pelo DER-SP (sem pedágio). Eles variam entre trechos planos (declividade média de 0,5% e 0% de trechos de ultrapassagem proibida) e trechos em relevo ondulado (rampas entre 3% e 5% e 42% de zonas de ultrapassagem proibida), com porcentagens de caminhões variando entre 26% e 42% e fluxos horários de 100 a 500 veic/h. Nenhum trecho estudado possuía faixa adicional de subida.

Tabela 1: Trechos de rodovias selecionados para a coleta de dados

Rodovia	km inicial	km final	Extensão (km)	Referência
SP215	133	138	5	Descalvado – São Carlos
SP225	113	121	8	Brotas – Itirapina
SP225	133	141	8	Brotas – Itirapina
SP253	151	155	4	Pradópolis – Luis Antônio
SP322	382	389	7	Pitangueiras – Bebedouro

Cada coleta de dados teve duração de quatro horas ininterruptas. Os dados sobre a composição do tráfego (quantidade de automóveis e caminhões), tempo de viagem, velocidade média, porcentagem de veículos em pelotões foram obtidos através de imagens gravadas e de observações feitas no local do levantamento dos dados. Um veículo foi considerado em pelotão quando o seu *headway* era menor ou igual a três segundos.

O algoritmo genético foi codificado em Perl. O processo de calibração foi executado em um computador AMD Athlon 2800 com 512 MB de memória RAM. Após 350 gerações, foram executadas mais de 340 mil simulações, que exigiram um tempo total de processamento de 3 dias. A versão calibrada do TRARR, obtida ao final do processo, é capaz de simular fluxos de tráfego em rodovias como as usadas no processo de calibração com uma diferença de apenas 2,55% entre os fluxos simulados e os observados. Para a validação do modelo calibrado, foi usado um segundo conjunto de dados, também coletado nos cinco trechos. A diferença média encontrada na validação foi de 4,94%. Deve-se ressaltar que, usando-se a versão original do TRARR, essa diferença é de 8,55%, o que demonstra a eficiência do algoritmo genético na calibração do modelo.

4. ADAPTAÇÃO DO CAPÍTULO 20 DO HCM-2000

A adaptação do procedimento do HCM2000 foi feita através da determinação de novos valores para os fatores de ajuste tabelados no capítulo 20. Esta adaptação foi realizada através dos mesmos estudos de simulação realizados para a obtenção dos fatores apresentados no HCM2000 (Harwood *et al.*, 1999). A única diferença foi a substituição do TWOPAS pela versão do TRARR calibrada e validada para representar as características do tráfego numa rodovia típica no Brasil.

4.1. Relação fluxo-velocidade e fluxo-porcentagem de veículos em pelotões

No HCM2000, a qualidade de serviço de rodovias de pista simples é determinada em função de duas medidas de desempenho: a velocidade média de percurso (*ATS*) e a porcentagem do tempo viajando em pelotões (*PTSF*). O comportamento do tráfego em rodovias de pista simples pode ser caracterizado através das rela-

Tabela 2: Relações fundamentais do HCM-2000

<i>Medida de desempenho</i>	<i>HCM-2000</i>	<i>Brasil</i>
ATS	$ATS = FFS - 0,0125 \cdot v$	$ATS = FFS - 0,0119 \cdot v$
PSTF	$PSTF = 100 \cdot (1 - e^{-0,000879 \cdot v_p})$	$PSTF = 100 \cdot (1 - e^{-0,000520 \cdot v_p})$

ções fluxo-velocidade e fluxo-porcentagem de tempo viajando em pelotões. Estas relações mostram a variação das duas medidas de desempenho em função da magnitude do fluxo de tráfego, e devem ser obtidas de resultados de simulações, pois são relativas a um fluxo de tráfego composto apenas por automóveis que viajam numa rodovia com características ideais, cenário pouco provável de ser observado numa situação real.

Neste estudo, decidiu-se que a forma geral das relações do HCM2000 era adequada, considerando-se os dados coletados. Por conseguinte, novos coeficientes de ajuste foram encontrados para as equações apresentadas no HCM2000, os quais estão apresentados na Tabela 2. A relação para *PSTF* apresentada refere-se à análise bidirecional.

O coeficiente encontrado para a velocidade média de percurso foi apenas 5% menor que o adotado no HCM2000. Isso indica que nas rodovias brasileiras estudadas, os motoristas de automóveis esperariam, para condições ideais, desenvolver uma velocidade média de percurso (*ATS*) maior que a encontrada para os Estados Unidos. Com relação à porcentagem de tempo viajando em pelotões, as diferenças são mais evidentes. O valor do coeficiente encontrado para o Brasil é menor que o adotado no HCM-2000, sugerindo que os motoristas brasileiros devem ser mais agressivos, tolerando menos a permanência em pelotões durante a viagem.

4.2. Obtenção dos novos fatores de ajuste

Os fatores de ajuste adaptados às condições locais foram: fator de pico horário (*PHF*); fator de ajuste para o efeito de rampas (f_G); fator de equivalência veicular (E_T); fator de ajuste para zonas de ultrapassagem proibida na velocidade média de percurso (f_{np}) e fator de ajuste para o efeito combinado da distribuição direcional do tráfego e da porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida na porcentagem de tempo viajando em pelotões (f_{dnp}). À exceção do primeiro fator (*PHF*), os fatores de ajuste foram obtidos por meio de experimentos de simulação, a partir da versão do TRARR calibrada para representar uma rodovia típica do Brasil. O modelo foi calibrado para rodovias sem faixa adicional de subida. Nos próximos itens serão apresentados os experimentos e os valores obtidos para cada fator adaptado.

4.2.1. Fator de pico horário

As análises do HCM são baseadas em fluxos nos 15

minutos mais congestionados dentro da hora de interesse, que é geralmente a hora de pico. O fator de pico horário *PHF* permite calcular este fluxo a partir do volume total da hora. O fator de pico horário foi calculado a partir dos dados coletados para calibração e validação do simulador. Os valores do *PHF* encontrados para as rodovias observadas são mostrados na Tabela 3. O valor médio dos fatores observados foi considerado como característico das rodovias observadas.

O valor encontrado para o fator de pico horário coincide com o valor sugerido pelo HCM2000, que recomenda, em casos em que não for possível determinar o *PHF* a partir de dados de campo, adotar-se o valor de 0,88 para áreas rurais e 0,92 para áreas urbanas (Harwood et al, 1999; p. 125).

Tabela 3: Fatores de pico horário (*PHF*) observados nos trechos estudados

<i>Rodovia</i>	<i>1ª coleta</i>	<i>2ª coleta</i>
SP215	0,85	0,86
SP225 1o trecho	0,87	0,89
SP225 2o trecho	0,89	0,86
SP253	0,88	0,89
SP322	0,92	0,91
<i>PHF médio</i>	0,88	

4.2.2. Fator de ajuste para o efeito de rampas

O fator de ajuste de rampas f_G é usado para levar em conta o efeito do relevo na velocidade média de percurso (*ATS*) e na porcentagem de tempo viajando em pelotões (*PTSF*). Ele é obtido através da relação entre o valor de *ATS* (ou *PTSF*) de uma corrente de tráfego trafegando em uma rodovia localizada em relevo plano e o valor de *ATS* (ou *PTSF*) da mesma corrente de tráfego em uma rodovia localizada em local com relevo ondulado. Como feito para o HCM2000, os valores de f_G foram obtidos a partir de resultados de simulações em que foram usados 42 tipos de relevo (plano, ondulado e 40 combinações de declividades e comprimentos de rampa) e 3 valores de fluxo de tráfego (400, 800 e 1600 veíc/h para ambas as direções de tráfego combinadas).

As simulações foram feitas com uma corrente de tráfego composta por 100% de carros de passeio com uma distribuição direcional 50%–50%. Um trecho de 10 km foi simulado para rodovias de relevo plano e para as de relevo ondulado. Os trechos em rampas não possuíam faixas adicionais e tinham declividades de 3%, 4%, 5%, 6% e 7% e comprimentos de 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,4; 3,2; 4,8 e 6,4 km. Cada uma das possí-

veis combinações foi replicada 5 vezes, totalizando 630 simulações ($42 \times 3 \times 5$). Os valores do fator de ajuste obtidos dessas simulações estão mostrados na Tabela 4 e na Tabela 5, respectivamente para estimativa de *ATS* e *PSTF*.

Tabela 4: Fator de ajuste f_G para estimativa da *ATS* em segmentos direcionais e bidirecionais

Fluxo bidirecional (cp/h)	Fluxo direcional (cp/h)	Tipo de terreno	
		Plano	Ondulado
0 – 600	0 – 300	1,00	0,72
> 600 – 1200	> 300 – 600	1,00	0,89
> 1200	> 600	1,00	0,93

Tabela 5: Fator de ajuste f_G para estimativa da *PSTF* em segmentos direcionais e bidirecionais

Variação do fluxo bidirecional (cp/h)	Variação do fluxo direcional (cp/h)	Tipo de terreno	
		Plano	Ondulado
0 – 600	0 – 300	1,00	0,77
> 600 – 1200	> 300 – 600	1,00	0,87
> 1200	> 600	1,00	0,92

Os valores encontrados para o Brasil são um pouco menores que os adotados no HCM2000. Isso sugere que o desempenho dos veículos brasileiros ao trafegarem em um relevo ondulado é mais afetado do que o desempenho dos veículos considerados no HCM. Isso faz sentido, já que os automóveis brasileiros são equipados com motores menos potentes que os norte-americanos.

Para o menor fluxo (até 600 cp/h, se for considerado o fluxo bidirecional) os valores determinados são praticamente os mesmos. Para os demais fluxos, a tendência é de os novos valores serem menores que os do HCM. Ao se utilizar um fator ou outro na determinação do nível de serviço de uma rodovia, o resultado obtido pode variar em função dessa diferença. Ou seja, para um mesmo fluxo de tráfego observado, o fluxo equivalente em carros de passeio tende a ser maior que os obtidos utilizando os f_G originais do HCM2000.

4.2.3. Fator de ajuste para veículos pesados

O fator de ajuste de veículos pesados f_{HV} representa o efeito da presença de veículos pesados presentes na corrente de tráfego e serve para converter uma corren-

te de tráfego em veículos por hora (veic/h) para um fluxo de tráfego equivalente em carros de passeio por hora (cpe/h):

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1)} \quad (3)$$

em que,

f_{HV} : fator de ajuste para veículos pesados;

P_T : proporção de caminhões e ônibus na corrente de tráfego (em decimais);

P_R : proporção dos veículos de recreação na corrente de tráfego (em decimais);

E_T : carros de passeio equivalente para os caminhões e

E_R : carros de passeio equivalente para os veículos de recreação.

Para as rodovias de pista simples brasileiras foram determinados os valores dos equivalentes veiculares apenas para os caminhões (E_T), através de simulação. Não foram determinados fatores de equivalência veicular para os veículos recreacionais (*motorhomes*, etc.), pois a porcentagem observada deste tipo de veículo nas rodovias estudadas foi nula. Por causa disso, o modelo de simulação não pode ser calibrado para simular adequadamente este tipo de veículo, o que impede o cálculo dos fatores de equivalência para esta classe veicular. Os cenários analisados foram similares aos usados na obtenção do fator de ajuste de rampas (f_G).

As simulações foram feitas com uma corrente de tráfego composta por 100% de automóveis com uma distribuição direcional 50%–50%. Um trecho de 10 km foi simulado para rodovias de relevo plano e para as de relevo ondulado. Cada uma das possíveis combinações foi replicada 5 vezes. O número total de simulações executadas foi 1890 (42 tipos de relevos \times 3 volumes de tráfego \times 3 composições de tráfego \times 5 replicações). O fluxo misto simulado foi composto por 39% de caminhões e 61% de automóveis, que é a composição média observada nos trechos estudados. Os novos valores dos fatores de equivalência veicular mostrados nas Tabelas 6 e 7.

O fator de equivalência veicular E_T para a velocidade média de percurso obtido foi maior que o fator de

Tabela 6: Valores de E_T para estimar *ATS* em segmentos direcionais e bidirecionais

Tipo de veículo	Fluxo bidirecional (cp/h)	Fluxo direcional (cp/h)	Tipo de terreno	
			Plano	Ondulado
Caminhões, E_T	0 – 600	0 – 300	5,9	4,3
	> 600 – 1200	> 300 – 600	3,9	3,5
	> 1200	> 600	2,4	2,4

Tabela 7: Valores de E_T para estimar *PTSF* em segmentos direcionais e bidirecionais

Tipo de veículo	Fluxo bidirecional (cp/h)	Fluxo direcional (cp/h)	Tipo de terreno	
			Plano	Ondulado
Caminhões, E_T	0 – 600	0 – 300	1,1	1,0
	> 600 – 1200	> 300 – 600	1,1	1,1
	> 1200	> 600	1,0	1,0

equivalência veicular fornecido no HCM2000. Para a porcentagem de tempo viajando em pelotões, o E_T encontrado para relevo ondulado foi menor que o adotado no HCM2000 para fluxos abaixo de 1200 cp/h. Estas diferenças podem ser atribuídas, ao menos em parte, à diferença entre a composição média do tráfego nas rodovias estudadas e a adotada para o HCM2000 (39% vs. 14% de caminhões). Outro aspecto importante são as diferenças nas relações peso/potência dos caminhões brasileiros e americanos.

A corrente de tráfego simulada com o TRARR era composta por 39% de caminhões; nos Estados Unidos, a corrente típica simulada era composta por apenas 14% de caminhões. Ou seja, a quantidade de caminhões presente na corrente de tráfego no Brasil é 25 pontos percentuais maior e isso pode ter causado a maior perda de velocidade na corrente de tráfego mista em relação à velocidade desenvolvida pela corrente de tráfego composta apenas por automóveis de passeio. Isso teria levado a obter valores de equivalentes veiculares para ATS maiores que os do HCM-2000.

4.2.4. Fator de ajuste para efeito de zonas de ultrapassagem proibidas

O fator de ajuste para o efeito de zonas de ultrapassagem proibida f_{np} é aplicado na obtenção da velocidade média de percurso e pode ser obtido a partir de simulações. Cada valor representa a diferença entre a velocidade média de percurso para uma porcentagem específica de zonas de ultrapassagem proibida, e a velocidade média de percurso no mesmo trecho, sem restrição de ultrapassagem. Como não há uma descrição clara em Harwood *et al.* (1999) sobre o cenário simulado, adotou-se o mesmo usado para o cálculo dos fatores de ajuste de rampa e equivalentes veiculares: um trecho plano com 10 km de extensão sem nenhuma restrição de ultrapassagem, fluxo composto somente por carros de passeio e distribuído igualmente nas duas direções de tráfego. A partir dos resultados dos experimentos de simulação foram obtidos os novos valores de f_{np} e que estão mostrados na Tabela 8.

Os valores do f_{np} do HCM2000 são maiores que os encontrados, sugerindo que os motoristas brasileiros são mais agressivos que os americanos. Ou seja, a variação na porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida não altera muito o comportamento do motorista brasileiro, resultando em fatores menores. Os valores adotados no HCM2000 são maiores, mostrando que a redução na velocidade média de percurso é maior para uma mesma porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida. O valor máximo do fator ocorre para 100% de zonas de ultrapassagem proibida e é 7,0 km/h no HCM2000 e 2,0 km/h para a adaptação proposta (para 400 cp/h).

Tabela 8: Fator de ajuste f_{np}

Fluxo direcional de tráfego (cp/h)	Redução na velocidade média de percurso (km/h)					
	Zonas de ultrapassagem proibida (%)					
	0	20	40	60	80	100
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
200	0,0	0,2	0,4	0,6	0,9	1,5
400	0,0	0,3	0,5	0,8	1,2	2,0
600	0,0	0,4	0,6	1,0	1,4	1,9
800	0,0	0,4	0,7	0,9	1,3	1,7
1000	0,0	0,3	0,5	0,7	1,0	1,4
1200	0,0	0,3	0,5	0,7	0,8	1,1
1600	0,0	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
2000	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7
2400	0,0	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5
2800	0,0	0,3	0,3	0,5	0,6	0,3
3200	0,0	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3

4.2.5. Fator de ajuste para o efeito combinado da distribuição direcional do tráfego e das zonas de ultrapassagem proibida

O fator de ajuste para o efeito combinado da distribuição direcional do tráfego e porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida é aplicado somente na obtenção da porcentagem de tempo viajando em pelotões (PTSF). Seus valores são obtidos através de simulação e representam a diferença entre a porcentagem de tempo viajando em pelotões para uma determinada divisão direcional do tráfego e determinada porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida e a porcentagem de tempo viajando em pelotões obtida com divisão direcional 50%–50% e nenhuma restrição de ultrapassagens. Os valores de $f_{d/np}$ obtidos são fornecidos na Tabela 9.

Os fatores $f_{d/np}$ encontrados são menores que os usados no HCM2000, o que sugere que o comportamento dos motoristas não é muito afetado pela variação combinada da porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida e da divisão direcional do tráfego. O que se espera é que o fator $f_{d/np}$ (obtido a partir da variação de dois parâmetros) seja maior que o fator f_{np} , que é obtido somente a partir da variação de zonas de ultrapassagem proibida. Isso indica que o simulador reproduz adequadamente o comportamento do tráfego.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Novas relações fundamentais fluxo velocidade média de percurso e fluxo porcentagem de tempo viajando em pelotões, específicas para uma rodovia típica do estado de São Paulo, foram encontradas a partir de resultados de simulação. As diferenças observadas nos valores dos coeficientes obtidos ocorreram devido ao comportamento mais agressivo dos motoristas brasi-

Tabela 9: Fator de ajuste $f_{d/np}$

Fluxo direcional de tráfego (cp/h)	Aumento na porcentagem de tempo viajando em pelotões (%)					
	Zonas de ultrapassagem proibida (%)					
	0	20	40	60	80	100
Divisão direcional do tráfego 50% - 50%						
≤ 200	0,0	0,9	1,4	2,1	3,0	5,8
400	0,0	0,8	1,5	2,4	3,9	6,1
800	0,0	0,9	1,5	2,1	3,1	4,6
1400	0,0	0,5	0,9	1,2	1,6	2,2
2000	0,0	0,3	0,5	0,5	0,7	1,0
3200	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,3
Divisão direcional do tráfego 60% - 40%						
≤ 200	0,4	1,8	2,6	3,2	4,3	8,1
400	0,7	1,9	3,0	4,2	5,4	8,0
600	0,6	0,8	1,4	2,3	3,2	4,9
1400	0,1	0,7	0,8	1,2	1,4	2,0
2000	0,0	0,9	1,0	1,3	1,5	1,7
≥ 2600	0,0	0,5	0,6	0,9	0,8	0,8
Divisão direcional do tráfego 70% - 30%						
≤ 200	2,0	3,3	4,2	5,0	5,8	9,3
400	2,2	3,5	3,9	5,1	6,8	9,5
800	0,3	1,2	1,8	2,5	3,5	4,7
1400	0,8	1,5	1,8	2,1	2,7	3,4
≥ 2000	0,8	1,2	1,4	1,7	2,0	2,1
Divisão direcional do tráfego 80% - 20%						
≤ 200	3,5	4,4	5,8	6,6	7,8	12,6
400	4,4	6,0	7,7	8,7	10,2	13,5
600	3,4	5,4	6,1	7,3	8,1	10,7
1400	0,0	2,8	3,0	3,6	4,3	4,9
≥ 2000	0,0	1,5	1,9	2,3	2,8	2,7

leiros. Isso significa que, nas rodovias estudadas no Brasil, observa-se uma maior velocidade média de percurso e uma menor porcentagem de tempo viajando em pelotões, em relação às rodovias norte-americanas.

Com relação ao valor do fator de pico horário (PHF), que define a variação sub-horária dos fluxos de tráfego, não foram encontradas diferenças entre os valores sugeridos no HCM2000 e os observados nas rodovias estudadas.

O desempenho dos veículos observados nas rodovias estudadas no Brasil é mais afetado devido à presença de rampas, para fluxos maiores que 600 cp/h, do que nos Estados Unidos, onde os veículos são equipados com motores mais potentes. Por isso, os valores do fator de ajuste para os efeitos de rampa (f_G) para fluxos até 600 cp/h foram praticamente os mesmos do HCM2000; para fluxos maiores, os valores de f_G obtidos, tanto para ATS como para $PTSF$, foram menores que os do HCM2000.

Os valores encontrados para os fatores de equivalência veicular E_T baseados na velocidade média de percurso foram maiores que os do HCM2000. Em contrapartida, os equivalentes obtidos para a porcentagem de tempo viajando em pelotões foram menores que os do HCM2000. A diferença na corrente de tráfego mista simulada (39% de caminhões vs. 14% de caminhões no HCM2000) pode explicar os valores de equivalentes encontrados.

Os novos valores obtidos para os fatores f_{np} e $f_{d/np}$ foram menores que os adotados no HCM2000. Como esses fatores estão relacionados com o comportamento

do motorista ao dirigir, frente à presença de zonas de ultrapassagem proibida na rodovia, esse resultado indica uma maior agressividade dos motoristas brasileiros.

Os novos valores podem substituir as tabelas fornecidas no HCM2000 para a análise de capacidade e nível de serviço de rodovias de pista simples no Brasil.

AGRADECIMENTOS

O apoio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa relatada neste artigo foi obtido junto à FAPESP e junto ao CNPq, a quem os autores agradecem. Os autores também agradecem ao Prof. Laurence R. Rilett (University of Nebraska-Lincoln, EUA), pela colaboração para desenvolvimento do algoritmo genético utilizado nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Botha, J. A.; X. Zeng e E. Sullivan (1993) Comparison of performance of TWOPAS and TRARR models when simulating traffic on two-lane highways with low design speeds. *Transportation Research Record*, n. 1308; p. 7-16.
- Botma, H. (1986) Traffic operation on busy two-lane rural roads in the Netherlands. *Transportation Research Record*, n.1091, p.126-131.
- Botma, H.; Fi, I. (1991) Traffic operation on 2-lane roads in Hungary and the Netherlands Highway Capacity and Level of Service, In: International Symposium on Highway Capacity, Karlsruhe, Germany, 1991. *Proceedings*. Karlsruhe, Germany, Balkema (AA), p. 41-53.
- Brlon, W.; Weiser, K. (1998) Capacity and Speed-Flow Relationships on Rural Two-Lane Highways in Germany. In: Third International Symposium on Highway Capacity, Copenhagen, Denmark, 1998. *Proceedings*. Copenhagen, Denmark, Road Directorate, p. 199-218.
- Cheu, R.; X. Jin; K. Ng, Y. Ng e D. Srinivasan (1998) Calibration of FRESIM for Singapore Expressway using genetic algorithm. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, v. 124, n. 6.
- Egami, C. Y. (2000) *Recalibração de um modelo de simulação do tráfego em rodovias de pista simples*. São Carlos. 137p. Dissertação

(Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

- Egami, C. Y.; Setti, J. R. e Rilett, L. R. (2004) Algoritmo genético para a calibração automática de um simulador de rodovias de pista simples. *Transportes*, v. 12, n. 2, p. 5-14.
- Elefteriadou, L.; Torbic, D.; Webster, N. (1997) Development of Passenger Car Equivalents (PCE) for Freeways, Two-Lane Highways and Arterials. *Transportation Research Record*, n. 1572, p. 51-58.
- Harwood, D. W.; A. D. May; I. B. Anderson; L. Leiman; A. R. Archilla (1999) *Capacity and Quality of Service of Two-Lane Highways – Final Report*, Transportation Research Board, National Research Council, 166 p.
- Hoban, C. J.; R. J. Shepherd; G. J. Fawcett; G. K. Robinson (1991) *A Model for Simulating Traffic on Two-Lane Rural Roads – User Guide and Manual for TRARR Version 3.2*. Victoria - Australia, ARRB.
- Hourdakis, J.; Michalopoulos, P. G.; Kottommannil, J. (2003) Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record*, n. 1852, p. 130-139
- Kim, K. e L. R. Rilett (2001) Genetic-Algorithm-Based Approach for Calibrating Microscopic Simulation Models. In: *Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference 2001*, Oakland, USA, IEEE, p. 698–704.
- Kim, K. e L. R. Rilett (2004) A Genetic Algorithm Based Approach to Traffic Micro-simulation Calibration Using ITS Data. In: *Transportation Research Board 83rd Annual Meeting*, Washington, D.C., CD-ROM.
- Koorey, G. (2002) Assessment of rural road simulation modeling tools. In: *IPENZ Transportation Group Technical Conference 2002*. (http://ipenz.org.nz/test/ipenztg_cd/cd/2002_pdf/23_koorey_simulation.pdf.) Acesso em: 28/jan/2004.
- Luttinen, R. T. (2000) Level of Service on Finnish Two-lane Highways. In: *Fourth International Symposium on Highway Capacity. Proceedings*. Hawaii, USA, Transportation Research E-Circular, E C018, p. 175-187.
- MA, T. e B. Abdulhai (2001) Genetic Algorithm-Based Combinatorial Parametric Optimization for the Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models. In: *Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference 2001*, Oakland, USA, IEEE, p. 846–853.
- Ma, T. e B. Abdulhai (2002) Genetic Algorithm-Based Optimization Approach and Generic Tool for Calibrating Traffic Microscopic Simulation Parameters. *Transportation Research Record* 1800, p. 6–15.
- McLean, J. R. (1989) *Two-Lane Highway Traffic Operations – Theory and Practice*. New York, Gordon and Breach Science Publishers.
- Polus, A.; Craus, J.; Livneh, M. (1991) Flow and Capacity Characteristics on Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record*, n. 1320, p. 128-134.
- Rilett, L. R. e K. Kim (2001) Automatic Calibration of the Surface Transportation and Supply Models Using ITS Data. *Proceedings of the 9th World Congress on Transport Research*, Seoul, Korea.
- Yagar, S. (1983) *Capacities for Two-Lane Highways*. Australian Road Research, p.3-9.