

VERIFICAÇÃO DA ACURÁCIA DE ESTIMATIVAS DO NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES NO ESTADO DE SÃO PAULO

Flávio Satoshi Utimura

José Reynaldo Setti

Cíntia Yumiko Egami

Márcia Lika Mon-Ma

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar a precisão de estimativas do nível de serviço de rodovias de pista simples obtidas através de dois procedimentos diferentes: o do Highway Capacity Manual (HCM2000) [TRB, 2000] e sua adaptação para as condições encontradas no Brasil proposta por Egami [2006]. As medidas de desempenho utilizadas para a comparação são a velocidade média de percurso (ATS) e a porcentagem de tempo viajando em pelotões (PTSF). Na análise, foram usados 53 conjuntos de dados (ATS e PTSF) obtidos em sete trechos de rodovias no Estado de São Paulo, englobando uma ampla gama de condições de tráfego e de geometria viária. Enquanto ATS foi observada diretamente nos trechos, PTSF teve que ser obtida indiretamente, através de simulações feitas com o modelo TWOPAS, já que sua medição direta é inviável. Os resultados das comparações mostraram que a versão adaptada forneceu estimativas mais precisas do que as obtidas através do procedimento original do HCM2000.

ABSTRACT

The objective of the research reported in this paper is to verify the accuracy of level of service estimates for two-lane highways performed with two different procedures: the HCM2000 procedure and its adaptation to Brazilian highways proposed by Egami [2006]. The performance measures used in this comparison were the average travel speed (ATS) and percent time spent following (PTSF). The analyses were performed using 53 data sets collected in seven road segments located within the state of São Paulo. These segments encompassed a wide range of traffic and road geometry conditions. While ATS was obtained from direct observation at the sites, PTSF was obtained indirectly, using the TWOPAS model. The results of the comparisons indicate that the adapted procedure is capable of producing more accurate estimates than the application of the original HCM2000 procedure.

1. INTRODUÇÃO

Em um país onde o modo rodoviário de transporte é responsável por aproximadamente 96% do transporte de passageiros e 62% do transporte de cargas [CNT, 2006], é fundamental dispor de uma metodologia de avaliação da qualidade do nível de serviço em rodovias adaptada para as condições brasileiras, já que informações sobre a capacidade e o nível de serviço são fundamentais para a administração e o planejamento de investimentos na rede rodoviária, principalmente nos segmentos operados sob concessão. Em uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte [CNT, 2006], abrangendo 84.382 km de rodovias em todo Brasil que representam as principais rotas de transporte rodoviário, as rodovias de pista simples representaram 89,7% da malha rodoviária pesquisada, o que demonstra sua importância para a economia nacional.

O *Highway Manual Capacity* [TRB, 2000] é a referência básica para a análise da qualidade de serviço em rodovias. Desenvolvido nos EUA, em sua edição mais recente, o HCM2000 [TRB, 2000] contém procedimentos para estimativa da capacidade e nível de serviço para diversos componentes do sistema de transporte rodoviário. Entretanto, como foram obtidos a partir de dados coletados em rodovias americanas e canadenses, os parâmetros destes procedimentos devem ser adaptados para outros países, se as características do tráfego, dos veículos e das rodovias forem diferentes. Alguns países já desenvolveram adaptações

próprias, como o HBS2001, manual equivalente ao HCM desenvolvido na Alemanha, onde 90% da malha rodoviária rural é composta por rodovias de pista simples [Brilon e Weiser, 2005].

A adaptação proposta por Egami [2006] do Highway Manual Capacity para análise da capacidade e nível de serviço para as condições encontradas no Brasil para rodovias de pista simples visou preencher esta lacuna pois, atualmente, utiliza-se o procedimento do HCM2000 em sua versão original, com parâmetros obtidos em pesquisas realizadas nos Estados Unidos.

Um aspecto importante no desenvolvimento de adaptações como essa é a qualidade das estimativas do nível de serviço produzidas. Assim sendo, este trabalho teve como objetivo comparar o nível de serviço (NS) observado em rodovias de pista simples no estado de São Paulo com as estimativas do nível de serviço obtidas a partir do método do HCM2000 [TRB, 2000] e do método adaptado para o Brasil por Egami [2006], visando determinar destes dois procedimentos fornece as melhores estimativas para o conjunto de trechos estudados.

2. NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

O nível de serviço é uma medida de qualidade operacional em uma rodovia e é representado por letras de A a F, sendo que A representa o melhor nível de serviço, E representa a capacidade e F significa via congestionada. As medidas de desempenho adotadas pelo HCM2000 para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples são a porcentagem de tempo viajando em pelotão, PTSF (do inglês, “percent time spent following”) e a velocidade média de percurso, ATS (“average travel speed”). A Tabela 1 fornece os limites dos níveis de serviço. O nível de serviço F ocorre quando o fluxo excede a capacidade, ou seja, quando for maior que 3.200 veic/h, somando-se as duas direções, ou 1.700 veic/h, numa única direção [TRB, 2000].

Tabela 1: Nível de serviço em rodovias de pista simples de Classe I [TRB, 2000]

Nível de serviço	PTSF [%]	ATS [km/h]
A	≤ 35	> 90
B	> 35 – 50	> 80 – 90
C	> 50 – 65	> 70 – 80
D	> 65 – 80	> 60 – 70
E	> 80	≤ 60

Resumidamente, o processo de estimativa do nível de serviço de rodovias de pista simples do HCM2000 consiste em duas etapas, a primeira das quais sendo estimar *ATS* e *PTSF* através das equações:

$$ATS = FFS - 0.0125v_p - f_{np} \quad (1)$$

$$PTSF = 100(1 - e^{-0.000879v_p}) + f_{d/np} \quad (2)$$

em que *FFS*: velocidade de fluxo livre (km/h);
v_p: taxa de fluxo de tráfego nos 15 minutos mais congestionados (pce/h);
f_{np}: fator de ajuste para zonas de ultrapassagem proibida (km/h); e
f_{d/np}: fator de ajuste para o efeito combinado de zonas de ultrapassagem proibida e da distribuição direcional do tráfego (%).

A segunda etapa consiste na determinação do nível de serviço, usando-se a Tabela 1 e os valores de *ATS* e *PTSF* calculados através das Equações 1 e 2.

Egami [2006] propôs uma adaptação do HCM para que a estimativa da qualidade de serviço em rodovias de pista simples brasileiras fosse mais precisa e próxima da realidade. Na adaptação proposta, os limites dos níveis de serviço em relação à PTSF e à ATS continuaram os mesmos, assim como o procedimento de cálculo descrito no capítulo 20 do HCM2000. As alterações propostas são fundamentalmente novos valores para os fatores de ajuste usados no processo de estimativa do nível de serviço e novos parâmetros para as funções usadas para cálculo de *PTSF* e *ATS*. Através de simulações realizadas com uma versão do simulador de rodovias de pista simples *TRARR*, foram calculados novos valores para o fator de ajuste de rampas (f_g); para os equivalentes veiculares E_T e E_R , usados no cálculo do fator de ajuste f_{HV} ; para o fator de ajuste de zonas de ultrapassagem proibida, f_{np} ; e para o fator de ajuste $f_{d/np}$, relativo ao efeito da combinação da distribuição direcional do tráfego e das zonas de ultrapassagem proibida.

2.1. Determinação do nível de serviço real de um trecho

O nível de serviço real, num trecho de rodovia, pode ser determinado a partir de valores observados *in loco* das medidas de desempenho usadas para caracterizar a qualidade de serviço, a velocidade média de percurso (*ATS*) e a porcentagem de tempo viajando em pelotões (*PTSF*).

A velocidade média de percurso pode ser obtida diretamente da observação de uma corrente de tráfego; *PTSF*, por outro lado, é um parâmetro cuja observação direta em trechos longos é totalmente inviável [Al-Kaisy e Durbin, 2007], já que é dada pela relação entre o tempo de viagem quando o headway entre o veículo e seu antecessor na corrente é inferior a 3 segundos e o tempo total de viagem. O HCM2000 sugere que a porcentagem de veículos viajando em pelotões poderia ser uma medida “proxy” da *PTSF*, mas não estabelece como esta correlação pode ser feita.

Para contornar este problema, a determinação da porcentagem de tempo viajando em pelotões foi feita, nesta pesquisa, através de um modelo de simulação, recalibrado para representar, com a máxima fidelidade possível, a corrente de tráfego observada, como se discute a seguir.

3. USO DO SIMULADOR TWOPAS PARA OBTENÇÃO DE PTSF

Simulação consiste em empregar programas de computador com o propósito de representar o funcionamento de um sistema real, mas de situações ainda inexistentes ou que dificilmente seriam observadas na prática. Em estudos sobre tráfego rodoviário, isto traz vantagens, pois permite observar cada veículo individualmente, registrando-se suas atitudes ao longo da viagem. O modelo de simulação utilizado nesta pesquisa foi o TWOPAS, desenvolvido nos EUA e considerado um dos principais simuladores microscópicos para rodovias de pista simples. Capaz de simular a operação individual dos veículos na corrente de tráfego, foi utilizado no desenvolvimento do HCM2000 [Harwood et. al., 1999]. O TWOPAS atualmente constitui o módulo TAM (“Traffic Analysis Module”) do programa IHSDM (“Interactive Highway Safety Design Model”) do FHWA, responsável pela sua manutenção e distribuição.

O principal interesse em se utilizar a simulação foi obter a porcentagem de tempo viajando em pelotões, que é um dos resultados fornecidos pelo TWOPAS. A fim de garantir a precisão desta medida, o modelo deve ser calibrado individualmente para cada período observado, através de um algoritmo genético, com base nos dados coletados no trecho. Uma vez calibrado para o trecho estudado, pode-se admitir que o modelo reproduz o comportamento do

tráfego no trecho estudado com um alto grau de fidelidade e, conseqüentemente, fornecer uma medida confiável da PTSF.

4. MÉTODO

Para atingir o objetivo proposto, ou seja, verificar a confiabilidade da estimativa do nível de serviço através do processo original do HCM2000 e da sua adaptação feita por Egami [2006], o método usado consistiu nas seguintes etapas: (1) seleção de trechos e coleta de dados; (2) recalibração do modelo TWOPAS para simulação dos trechos estudados; (3) simulação dos trechos; (4) determinação do nível de serviço existente em cada trecho a partir dos dados coletados e dos resultados das simulações; (5) estimativa do nível de serviço com os dois métodos; e (7) comparação dos níveis de serviço estimados e observados e análise dos resultados. Estas etapas são discutidas a seguir.

5. SELEÇÃO DOS TRECHOS E COLETA DE DADOS

Vários fatores foram levados em consideração para seleção dos trechos a serem estudados, entre eles: volume e composição de tráfego; relevo; disponibilidade do projeto geométrico; e a ausência de faixas adicionais, acessos com grande movimento e interseções. Os trechos foram escolhidos para representar condições típicas de rodovias de pista dupla no estado de São Paulo, tanto do ponto de vista do tráfego como do projeto geométrico. A amostra inclui tanto rodovias operadas por concessionárias como rodovias operadas pelo DER-SP. Um total de sete trechos foi escolhido para este estudo. Os locais escolhidos incluem trechos em relevo plano (0% de zonas de ultrapassagem proibida e rampa média de 0,5%) a trechos em relevo ondulado (42% de zonas de ultrapassagem proibida e rampas variando entre 3% e 5%), que apresentam fluxos horários variando entre 100 e 500 veic/h, com porcentagem de veículos pesados entre 26% e 70%.

Tabela 2: Trechos estudados

Rodovia	Trecho		Data	Período
	km inicial	km final		
SP215	88	93	14/11/2006	8:00 – 11:30
SP215	107	111	12/12/2006	8:00 – 11:00
SP215	133	138	13/2/2004	7:20 – 11:20
			21/10/2004	14:30 – 18:30
SP225	113	121	21/1/2004	16:00 – 20:00
			22/10/2004	14:20 – 18:20
SP225	133	141	23/1/2004	7:15 – 11:15
			5/11/2004	7:20 – 11:20
SP253	151	155	30/1/2004	7:15 – 11:15
			3/11/2004	14:30 – 18:30
SP322	382	388	12/2/2004	15:00 – 19:00
			4/11/2004	14:20 – 18:20

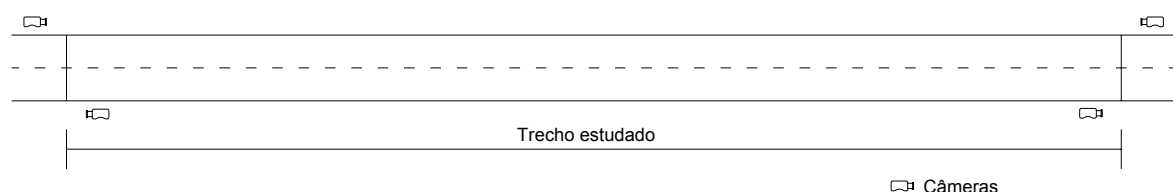


Figura 1: Posicionamento das câmeras para coleta de dados

No método de coleta empregado nesta pesquisa, câmeras de vídeo são posicionadas pontos de controle localizados na entrada e saída dos trechos em estudo. O posicionamento das câmeras pode ser observado na Figura 1. Os relógios internos das câmeras são sincronizados antes da coleta de dados, já que os dados coletados incluem o tempo de viagem ao longo do trecho, que é obtido a partir dos instantes de entrada e saída do trecho.

As informações coletadas são representações das condições observadas do tráfego do local. A coleta consistiu basicamente em fazer filmagens durante um período de três a quatro horas consecutivas de um dia e, adicionalmente, anotar dados sobre a ordem de passagem dos automóveis, suas placas e, quando possível, outras características como cor, marca e modelo. Uma posterior extração dos dados gravados foi realizada para determinar a composição do tráfego, o tempo gasto por cada veículo para percorrer o trecho (medido a partir dos tempos de entrada e saída do trecho) e os headways entre veículos nos pontos em que as câmeras estavam instaladas. As coletas foram realizadas em dias típicos, com tempo bom e durante o dia. A Tabela 2 lista os trechos analisados e as datas em que os dados foram coletados.

Com exceção das coletas realizadas no ano de 2006, os dados de tráfego foram desagregados em períodos de uma hora de duração; nas coletas realizadas em 2006, os dados foram desagregados em períodos de 30 minutos, totalizando 53 conjuntos de dados para os sete locais estudados.

6. RECALIBRAÇÃO DO TWOPAS

A partir dos dados coletados, o TWOPAS foi calibrado através de um algoritmo genético para reproduzir as condições observadas, em termos da velocidade média de percurso e das porcentagens de veículos em pelotões na entrada e na saída do trecho. O algoritmo genético usado foi desenvolvido numa outra pesquisa e está relatado em outro artigo [Egami et al., 2005]. O grau de fidelidade obtido nas simulações é bastante satisfatório, como pode ser depreendido da Figura 2, que compara fluxos simulados com observados, em função da velocidade média de percurso, *ATS*.

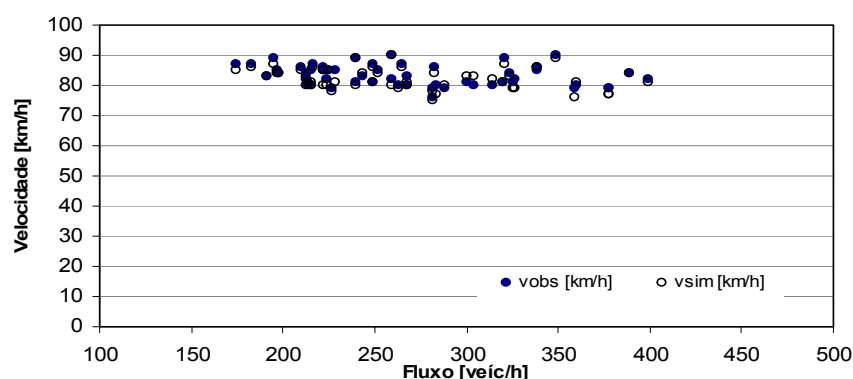


Figura 2: Comparação entre fluxos simulados e observados

7. OBTENÇÃO DOS NÍVEIS DE SERVIÇO

Para cada um dos 53 conjuntos de dados, o nível de serviço foi obtido de três modos diferentes. Inicialmente, foi determinado o nível de serviço real, a partir da velocidade média de percurso observada e da PTSF obtida na simulação do trecho com o conjunto de dados correspondente. Estes resultados estão resumidos na Tabela 3, nas colunas intituladas “observado”.

Tabela 3: Comparação entre nível de serviço observado e estimados

Amostra	Nível de serviço			Amostra	Nível de serviço		
	Observado	HCM2000	HCM-BR		Observado	HCM2000	HCM-BR
SP-215, 1º trecho (14/11/2006)				SP-215, 2º trecho (12/12/2006)			
1	B	C	B	1	B	C	B
2	B	C	B	2	B	C	B
3	B	B	B	3	B	C	B
4	B	B	B	4	C	C	B
5	B	C	B	5	C	C	B
6	B	C	B	6	C	C	B
7	B	C	B				
SP-215, 3º trecho (13/2/2004)				SP-215, 3º trecho (21/10/2004)			
1	B	C	B	1	B	C	B
2	B	C	B	2	B	C	B
3	B	C	B	3	B	C	B
4	B	C	B	4	B	C	B
SP-225, 1º trecho (21/1/2004)				SP-225, 1º trecho (22/10/2004)			
1	B	C	B	1	B	C	B
2	B	C	B	2	C	C	B
3	B	C	B	3	C	C	B
4	B	C	B	4	B	C	B
SP-225, 2º trecho (23/1/2004)				SP-225, 2º trecho (5/11/2004)			
1	B	B	B	1	B	C	B
2	B	B	B	2	B	C	B
3	B	B	B	3	B	C	B
4	B	B	B	4	C	C	B
SP-253, 30/1/2004				SP-253, 3/11/2004			
1	B	A	B	1	B	A	B
2	B	A	B	2	B	A	B
3	B	A	B	3	B	A	C
4	B	A	B	4	C	B	C
SP-322, 12/2/2004				SP-322, 4/11/2004			
1	B	B	B	1	B	C	B
2	B	C	B	2	B	C	B
3	B	C	B	3	B	C	B
4	B	C	B	4	B	C	B

A seguir, foram feitas duas estimativas do nível de serviço, uma usando o procedimento original do HCM2000 e outra usando o procedimento adaptado por Egami [2006]. A Tabela 3 sumariza esses resultados, nas colunas intituladas “HCM2000” e “HCM-BR”. Os níveis de serviço em negrito são aqueles em que há diferença entre o observado e o estimado pelo HCM-BR.

8. COMPARAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando-se as 53 amostras da Tabela 3, constata-se que a adaptação proposta por Egami [2006] fornece estimativas de nível de serviço mais condizentes com os valores observados em campo. Em apenas sete casos, em negrito na Tabela 3, resultados foram diferentes quando comparados os valores observados e os da adaptação do HCM. Em todos estes sete casos, o parâmetro que determinou a definição dos níveis de serviço foi a velocidade média de percurso, posto que seu nível de serviço foi igual ou inferior ao da

PTSF – ou seja, o uso do TWOPAS para estimar PTSF não foi a causa das possíveis diferenças nos níveis de serviço.

Tabela 4: Comparação entre porcentagem de tempo viajando em pelotões (PTSF)

Amostra	PTSF (%)			Amostra	PTSF (%)		
	Observada	HCM2000	HCM-BR		Observada	HCM2000	HCM-BR
SP-215, 1º. trecho (14/11/2006)				SP-215, 2º. trecho (12/12/2006)			
1	15	52	22	1	28	57	23
2	16	51	18	2	24	59	24
3	13	48	18	3	23	58	23
4	12	48	17	4	21	58	22
5	17	53	20	5	26	57	22
6	19	53	19	6	28	57	22
7	19	51	18				
SP-215, 3º trecho (13/2/2004)				SP-215, 3º trecho (21/10/2004)			
1	21	53	18	1	20	54	21
2	20	52	18	2	25	56	22
3	25	54	20	3	29	57	23
4	19	51	17	4	19	55	22
SP-225, 1º trecho (21/1/2004)				SP-225, 1º trecho (22/10/2004)			
1	31	58	24	1	26	63	28
2	27	58	24	2	36	63	28
3	27	57	22	3	37	64	29
4	21	54	20	4	40	64	30
SP-225, 2º trecho (23/1/2004)				SP-225, 2º trecho (5/11/2004)			
1	10	46	16	1	14	52	19
2	12	43	15	2	15	51	19
3	16	46	16	3	16	52	19
4	11	46	16	4	17	53	20
SP-253, 30/1/2004				SP-253, 3/11/2004			
1	9	24	15	1	16	25	19
2	8	22	14	2	13	25	19
3	11	22	13	3	21	29	23
4	11	22	13	4	20	33	25
SP-322, 12/2/2004				SP-322, 4/11/2004			
1	19	49	22	1	21	52	23
2	21	52	24	2	20	51	23
3	27	56	27	3	25	53	25
4	22	52	24	4	27	56	27

Dessas sete amostras cujas estimativas de nível de serviço feitas pelo método proposto por Egami [2006] diferiram do observado, seis foram iguais às estimativas obtidas usando-se o HCM2000. O parâmetro crítico que define o nível de serviço no método original do HCM2000 é sempre o PTSF, conforme mostra a Tabela 4. Isso poderia explicar por que o método original do HCM2000 fornece estimativas menos realistas do nível de serviço. Analisando-se os casos em que há diferença entre o nível de serviço real e o estimado pela adaptação proposta por Egami [2006], nota-se que a diferença, em valores absolutos, entre a velocidade média de percurso observada no campo e a estimada, é pequena e imperceptível quando se está guiando um veículo. Por exemplo, a ATS observada no primeiro trecho da SP225 foi de 79 km/h (NS C), e o método proposto estima uma ATS de 81 km/h (NS B). Nos

demais casos de discrepância, as diferenças entre ATS observada e estimada foram similares.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que a adaptação proposta por Egami [2006], fornece estimativas do nível de serviço mais confiáveis que as obtidas pela aplicação do método do HCM2000 sem adaptações para as condições das rodovias estudadas. Das 53 amostras colhidas nos sete trechos, em somente sete casos, a aplicação da adaptação proposta forneceu resultados diferentes dos observados. Ainda que este estudo tenha sido realizado num número relativamente pequeno de trechos, em função das restrições de recursos, seus resultados deixam evidente a necessidade de conduzir uma adaptação do HCM2000 para as condições encontradas em rodovias no Brasil, para que evitar imprecisões significativas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido do DER-SP, através das diretorias regionais de Bauru e Ribeirão Preto, e das concessionárias Autovias, Centrovias, Intervias e Vianorte que, além de fornecerem o projeto geométrico dos trechos estudados, também colaboraram com as coletas de dados. Esta pesquisa teve apoio financeiro do CNPq, através de uma bolsa PIBIC e uma bolsa de produtividade em pesquisa (proc. 302629/2005-0).

Referências Bibliográficas

- Al-Kaisy, A. e Durbin, C. [2007] Estimating Percent Time Spent Following on Two-Lane Highways: Filed Evaluation and New Methodologies. In: 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board. CD-ROM: Washington, DC, EUA, 16 p.
- Egami, C.Y. [2006]. Adaptação do HCM2000 para a Determinação do Nível de Serviço em Rodovias de Pista Simples Sem Faixas Adicionais no Brasil. São Carlos, 2006. 233 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Egami, C. Y.; Mon-Ma, M. L.; Setti, J. R. e Rilett, L. R. [2006] Automatic Calibration of Two-Lane Highway Traffic Simulation Models. In: 9th International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation, 2006, Chicago, EUA, p. 510–515.
- Brilon, W.; Weiser, K. [1998] Capacity and Speed-Flow Relationships on Rural Two-Lane Highways in Germany. In: Third International Symposium on Highway Capacity, Copenhagen, Dinamarca, 1998. Proceedings. Copenhagen, Denmark, Road Directorate, p. 199–218.
- CNT [2006] Pesquisa Rodoviária CNT – 2006. Disponível em: <http://www.cnt.org.br>. Acesso em 16/jun/2007.
- Leiman, L.; Archilla, A.R. e May, A.D. [1998]. “TWOPAS Model Improvements”. NCHRP Project 3-55(3). Capacity and Quality of Service on Two-lane Highways – Task 6 – Enhance, Calibrate, and Validate the Selected Simulation Model. MRI-University of California, Berkley, CA.
- Harwood, D.W.; May, A.D.; Anderson, I.B.; Leiman, L. e Archilla, A.R. [1999]. Capacity and Quality of Service on Two-lane Highways. Final Report, Project 3-55(3). National Cooperative Highway Research Program, TRB, Washington, DC, EUA.
- TRB [2000]. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board. Washington D.C.

Flávio Satoshi Utimura (satoshi@sc.usp.br)

José Reynaldo Setti (jrasetti@usp.br)

Cíntia Yumiko Egami (cintiaye@gmail.com)

Márcia Lika Mon-Ma (mmonma@hotmail.com)

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro
13566-590 – São Carlos, SP