

# COMPARAÇÃO ENTRE OS SIMULADORES CORSIM E TWOPAS PARA MODELAGEM DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

**José Elievam Bessa Júnior**  
**André Luiz Barbosa Nunes da Cunha**  
**José Reynaldo Setti**  
Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia de Transportes

## RESUMO

A meta deste trabalho foi comparar dois simuladores para modelagem de rodovias de pista simples, o TWOPAS e o CORSIM. Com essa comparação, pretende-se escolher o software que possui as melhores condições para desenvolver um método de avaliação da qualidade de serviço em rodovias brasileiras. Foram confrontados aspectos da lógica dos simuladores, como as distribuições de velocidades desejadas, os modelos de *car-following* e de ultrapassagens, os dados de entrada e de saída e a documentação e suporte técnico fornecidos aos usuários. Além disso, foram modelados 12 trechos de rodovias, tendo sido usados somente parâmetros *default* dos simuladores, com exceção da velocidade desejada média dos veículos (TWOPAS) e da velocidade de fluxo livre (CORSIM). Os resultados obtidos mostraram que os dois simuladores precisam ser calibrados para que possam reproduzir adequadamente o tráfego observado em campo. Por outro lado, diferenças importantes entre as características dos simuladores indicam que o CORSIM pode ser o melhor para estimar a qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil.

## ABSTRACT

The goal of this study was to compare two simulators for modeling of two-lane rural highways, TWOPAS and CORSIM. By this comparison, it is intended to choose the software that has the best conditions for development of a method for assessing the quality of service of Brazilian highways. Some aspects of logic of the simulators were confronted, such as the distribution of desired speeds, the car-following and overtaking models, the input and output data and the documentation and the technical support provided to users. In addition, 12 locations were modeled using only default parameters of the simulators, except for the mean desired speed of vehicles (TWOPAS) and the free flow speed (CORSIM). The results showed that the two simulators need to be calibrated so that they can adequately reproduce the observed traffic in the field. On the other hand, important differences between the characteristics of simulators indicate that CORSIM may be the best one to estimate the quality of service in two-lane rural highways in Brazil.

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, os simuladores de tráfego são utilizados na análise e no projeto de sistemas de transporte. Auxiliando na busca e no teste de soluções para problemas complexos, representam de maneira simplificada ações e interações que ocorrem no mundo real, provendo a capacidade de prever e estudar o que ocorrerá no sistema estudado sem intervir diretamente no tráfego (Kim e Rilett, 2001). Simuladores de tráfego têm sido usados para estudar impactos na qualidade do ar e no consumo de combustível, além de avaliar as condições do tráfego devido às mudanças nos alinhamento vertical e horizontal, na seção transversal, no volume e na composição veicular presente nas vias (Tapani, 2005).

Ao longo dos anos, vários simuladores foram desenvolvidos com abordagens diferentes, sendo que, em muitos casos, somente era possível a modelagem de redes urbanas ou autoestradas (Tapani, 2005). No caso de rodovias de pista simples, a interação entre os fluxos nos dois sentidos traz um grau maior de complexidade que implicou em um desenvolvimento mais lento dos modelos para esse tipo de estrada. Apesar disso, desde meados da década de 1980, os simuladores de rodovias de pista simples têm sido bastante usados, com destaque para o desenvolvimento de métodos para avaliar a capacidade e o nível de serviço, como é o caso das ver-

sões do *Highway Capacity Manual* (HCM) desde 1985 (TRB, 1985; TRB, 2000; TRB, 2010) e do manual alemão HBS2001 (FGSV, 2005).

Alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil (Egami *et al.*, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr. e Setti, 2010) produziram resultados que indicam a necessidade de um método adequado para avaliar a qualidade de serviço em rodovias de pista simples. Para isso, é necessário selecionar um simulador que forneça boas condições para o desenvolvimento de um método desse tipo para o Brasil. Os principais softwares disponíveis no mercado hoje são o TWOPAS (*Two-Lane Passing*), simulador que vem sendo usado para obter parte dos métodos do HCM desde a versão de 1985 (Leiman *et al.*, 1998); e o CORSIM (*Corridor Simulation*), modelo que simula o tráfego de diversos tipos de componentes, inclusive rodovias de pista simples (McTrans, 2010).

Devido ao grande número de simuladores existentes (que modelam vários tipos de redes viárias), alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com intuito de identificar aquele que melhor atenda a determinados objetivos de pesquisa (Botha *et al.*, 1993; Cunto e Loureiro, 2010). Sendo assim, este artigo tem como meta comparar as características do TWOPAS e do CORSIM. Esses simuladores foram submetidos a uma série de análises a fim de determinar qual, dentre eles, fornece as melhores condições para o desenvolvimento de um método para avaliar a qualidade de serviço em rodovias de pista simples.

## **2. MODELAGEM DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES**

Os primeiros simuladores de rodovias de pista simples surgiram na década de 1970, com destaque para o TWOPAS e o TRARR (Hoban *et al.*, 1991). De fato, existem poucos softwares que modelam esse tipo de rodovia, principalmente devido à complexidade dos modelos de *car-following* e de aceitação de *gaps* para mudança de faixa. Na literatura, os principais simuladores são do tipo microscópico e reproduzem o tráfego de maneira estocástica. Na maior parte dos casos, somente é possível simular rodovias com tráfego ininterrupto. Neste item, são apresentados alguns aspectos gerais do TWOPAS e do CORSIM, enquanto que as suas características foram abordadas com mais detalhes na seção seguinte.

### **2.1. TWOPAS**

O TWOPAS, chamado inicialmente de TWOWAF (*Two Way Flow*), foi criado no *Midwest Research Institute* (MRI), entre 1971 e 1974. Posteriormente, o TWOWAF foi ampliado pela *KLD Associates*, com modificações para incluir, por exemplo, faixas adicionais. Essa versão do TWOWAF passou a ser denominada TWOKLD e foi empregada no desenvolvimento do HCM1985 (Harwood *et al.*, 1999; FHWA, 2010). Em 1988, a *University of California Berkeley* juntou o TWOPAS e um simulador australiano, o TRARR, em uma interface chamada UCBRURAL. Em seguida, foram realizadas melhorias adicionais no TWOPAS visando seu uso na construção do capítulo 20 do HCM2000 (Leiman *et al.*, 1998; Harwood *et al.*, 1999). Em 2003, o TWOPAS foi incorporado a um programa maior criado pela FHWA, o IHSDM (*Interactive Highway Safety Design Model*). A interface foi a principal alteração com a criação do IHSDM, que se tornou mais amigável do que a UCBRURAL (Mon-Ma, 2008).

### **2.2. CORSIM**

O CORSIM possui dois modelos de simulação, o NETSIM (*Network Simulation*), que é usado para vias urbanas, e o FRESIM (*Freeway Simulation*), voltado para rodovias. O CORSIM está inserido numa interface conhecida como TSIS (*Traffic Software Integrated System*), que per-

mite ao usuário construir a rede viária em um arquivo de entrada com extensão TRF (arquivo texto) ou com extensão TNO (arquivo gráfico), simular determinadas condições de tráfego e, em seguida, visualizar o resultado dessa simulação (McTrans, 2010). A partir da versão 6, o CORSIM passou a modelar rodovias de pista simples, sendo que, para isso, foram: (i) adicionadas rotinas para modelar o tráfego em rodovias de pista simples; (ii) desenvolvidos mecanismos para integrar interseções; e (iii) modificados os dados de entrada e saída, quando necessário (McTrans, 2010; Washburn e Li, 2010).

### **2.3. Aplicações em redes viárias brasileiras**

Alguns trabalhos anteriores, desenvolvidos no Brasil, dão uma noção do nível de aplicabilidade do TWOPAS e do CORSIM e das dificuldades encontradas. Por meio de uma revisão na literatura, é possível identificar que esses dois simuladores têm sido bastante usado para propor métodos de calibração e fornecer subsídios para estimar níveis de serviço em rodovias. No caso do CORSIM, essas aplicações (Araújo, 2007; Cunha, 2007) envolveram rodovias de pista dupla, uma vez que somente a partir de 2010 o software incorporou a simulação de trechos de rodovias de pista simples. Nesses trabalhos, identificou-se que as calibrações realizadas forneceram bons resultados ao ajustar os modelos de *car-following*, de mudança de faixas, de desempenho veicular e os níveis de agressividade dos motoristas. Mesmo assim, o CORSIM apresentou dificuldades na modelagem dos problemas, sobretudo devido às limitações quanto ao número de categorias veiculares que podem ser simuladas.

Os trabalhos que envolveram o TWOPAS (Mon-Ma, 2008; Bessa Jr., 2009) também obtiveram bons resultados de calibração, realizando-se ajustes semelhantes aos desenvolvidos para o CORSIM, citados no parágrafo anterior. Mon-Ma (2008) apontou algumas dificuldades na aplicação do TWOPAS, especialmente para obter valores da “porcentagem de veículos em pe lotões” com o software que fossem semelhantes aos coletados em campo. Esse mesmo problema ocorreu no desenvolvimento do método do HCM2000 (Harwood *et al.*, 1999). Bessa Jr. (2009) apontou como uma limitação importante do TWOPAS o fato de não permitir a obtenção de dados veiculares desagregados, dificultando o estudo de novas medidas de desempenho da qualidade de serviço.

A partir da meta traçada e com base nas dificuldades apontadas na literatura, as análises foram realizadas visando os experimentos de simulação que deverão ser desenvolvidos em trabalhos futuros a fim de estimar adequadamente a qualidade de serviço. Sendo assim, neste artigo foram estabelecidos critérios de análise para: (i) a lógica dos simuladores, com o intuito de avaliar se os modelos de ultrapassagens, de *car-following* e de velocidades desejadas são adequados do ponto de vista da representação das redes viárias na prática; (ii) os dados de entrada e de saída, com vistas a encontrar o maior número de medidas de desempenho possível para estimar a qualidade de serviço; e (iii) a documentação e o suporte, fundamentais para entendimento e correta execução do simulador.

### **3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DO CORSIM E DO TWOPAS**

Tanto o TWOPAS como o CORSIM são simuladores microscópicos, compostos por submodelos que reproduzem situações específicas do tráfego, usados para dar flexibilidade para futuras modificações nos programas. Os dois simuladores possuem uma abordagem do tipo *time-based*, em que as condições dos veículos são atualizadas em períodos de tempo estabelecidos. Essa abordagem permite uma modelagem mais detalhada de cada veículo quanto menor for o período de atualização. Períodos mais curtos consomem mais recursos computacionais,

o que é desnecessário quando se deseja dados de saída agregados em determinados intervalos de tempo. No TWOPAS, as atualizações são feitas a cada 1 s, não podendo ser alterado pelo usuário. Por outro lado, no CORSIM esses intervalos podem ser pré-definidos, com intervalos entre 0,1 e 1,0 s (McLean, 1989; Leiman *et al.*, 1998, McTrans, 2010). Nos dois simuladores, as seguintes etapas são realizadas ao final de cada período de atualização:

- Adicionar veículos ao trecho modelado (se existir espaço suficiente na rodovia), sendo que cada tipo de veículo adicionado possui uma velocidade desejada proveniente de uma distribuição de frequência estabelecida;
- Atualizar a velocidade, a aceleração e a posição de cada veículo na rodovia;
- Remover veículos que chegaram ao destino;
- Atualizar o estado veicular, livre ou em *car-following*; ultrapassando ou sendo ultrapassado; e
- Salvar os dados.

### 3.1. Distribuição de velocidades desejadas

O termo “velocidade de fluxo livre” refere-se àquela desenvolvida quando um veículo percorre um determinado trecho sem nenhum tipo de impedimento, como outros veículos e características geométricas específicas. No entanto, em muitos casos essas condições favoráveis não são observadas, o que leva os motoristas à procura por um determinado nível de velocidade, definida como “desejada”. Obviamente, nem todos os motoristas esperam viajar a uma mesma velocidade, por isso alguns simuladores se valem de distribuições de velocidade desejadas. Assim, cada veículo inserido na simulação tem uma velocidade desejada associada, escolhida a partir de uma amostragem de Monte Carlo (McLean, 1989).

No TWOPAS, existe uma distribuição de velocidades desejadas para cada tipo de veículo e para cada sentido do tráfego. Para cada tipo de veículo/sentido, são definidas a média e o desvio padrão das velocidades desejadas. Podem ser modelados até 13 tipos de veículos no TWOPAS, sendo 4 caminhões e ônibus, 4 veículos de recreação e 5 automóveis. O modelo de desempenho pode ser configurado para cada um desses tipos. Podem ainda ser representados 10 tipos de motoristas, de acordo com a agressividade, por meio do fator estocástico do tipo de motorista, que representa um parâmetro multiplicativo de uma distribuição de *headways* utilizada no modelo de *car-following* (FHWA, 2010).

As distribuições de velocidades desejadas no CORSIM são representadas por porcentagens da velocidade de fluxo livre informada pelo usuário para cada *link* do trecho simulado. Existem 10 tipos de motoristas, que são tão agressivos quanto maior for a velocidade desejada. Para cada motorista, é possível também definir a agressividade quando os veículos estão em pelo-tão. Sendo assim, os tipos de motoristas estão relacionados com outros modelos, como a lógica de *car-following* e as manobras de ultrapassagens, detalhados adiante. É possível também modelar 9 tipos de veículos, cujo desempenho é definido por relações entre velocidade e aceleração. Desses 9 tipos de veículos, são 2 automóveis, 4 caminhões, 1 ônibus e 2 automóveis com alta ocupação, chamados de *carpool* (McTrans, 2010).

### 3.2. Modelo de *car-following*

Como citado na seção anterior, o modelo da *car-following* do TWOPAS é baseado num fator estocástico do tipo de motorista, determinado para cada um dos 10 tipos de motoristas e que representa um parâmetro multiplicativo de uma distribuição de *headways*. Além disso, o modelo também está relacionado com outro parâmetro, chamado “fator de sensibilidade de *car-*

*following*”. Na literatura, existem poucas referências a esse modelo, embora o manual do TWOPAS (FHWA, 2010) mencione que maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Messer (1986), desenvolvido quando o simulador foi usado para elaboração do método de análise de rodovias de pista simples do HCM1985.

A lógica de *car-following* do CORSIM é o modelo de Pitt (Halati *et al.*, 1997), usado para todos os tipos de rodovias. O modelo é baseado no espaçamento entre os veículos e na diferença de velocidades entre o veículo líder e veículos seguidores, com a premissa de que os veículos tendem a manter uma distância segura entre si (Washburn e Li, 2010). A lógica também considera a separação mínima entre os veículos; o fator de sensibilidade do tipo de motorista, que indica o nível de agressividade; e a diferença de velocidades entre os veículos líder e seguidor, que procura associar o comportamento dos motoristas devido à aproximação dos veículos (Schultz e Rillet, 2004).

O modelo de aceleração do CORSIM é acionado pelo veículo seguidor quando há necessidade de se evitar uma colisão, fazendo com que a distância para o veículos líder volte a ser segura. Esse modelo pode ser substituído por uma desaceleração emergencial, quando houver necessidade (Halati *et al.*, 1997).

### **3.3. Manobras de ultrapassagens**

As manobras de ultrapassagens representam a principal característica das rodovias de pista simples. Constitui-se num fenômeno complexo, pois somente podem ser realizadas quando existe um *gap* seguro no sentido oposto e, também, se houver distância de visibilidade suficiente. Para determinar a necessidade de uma ultrapassagem, o veículo deve estar num pelotão, definido para os veículos que se mantém com *headways* menores a 3 s, como recomendado pelo HCM. Além disso, o veículo em pelotão deve possuir uma velocidade pelo menos igual a do líder, para que o modelo de ultrapassagens seja iniciado.

O TWOPAS considera 6 estados para os veículos: (i) sem interrupções; (ii) ultrapassando um líder; (iii) seguindo um líder; (iv) seguindo o líder, mas com capacidade de ultrapassá-lo; (v) ultrapassando outro tipo de veículo que não seja o líder; (vi) abortando a ultrapassagem. Com exceção do estado (i), quando o veículo não está em pelotão, todas as outras condições são consideradas no cálculo da medida de desempenho “porcentagem de tempo viajando em pelotões, *PTSF* (Al-Kaisy e Durbin, 2007; FHWA, 2010). Além de outros veículos, as ultrapassagens também são realizadas no TWOPAS considerando-se os elementos geométricos da estrada, as zonas de proibição da manobra e as distâncias de visibilidade. As mudanças de faixas para realização de ultrapassagens também ocorrem em função de uma probabilidade do motorista reconsiderar a manobra, que indica a frequência com que os motoristas irão reavaliar as condições para ultrapassagens. Quando há faixas adicionais, não é permitido ocupar a faixa no sentido oposto, assim como no início e no final das faixas auxiliares (FHWA, 2010).

A lógica do CORSIM para realização de manobras de ultrapassagens, descrita com detalhes em Washburn e Li (2010), é baseada nos seguintes questionamentos:

- Quando se tentará uma ultrapassagem?
- Que restrições determinam o local da realização da manobra?
- Como um veículo executa a ultrapassagem?

No CORSIM, o desejo por ultrapassagens por parte dos veículos com melhor desempenho é baseado na “velocidade tolerável”, que é função da velocidade desejada, na diferença entre as velocidades corrente e desejada, nos comprimentos dos veículos envolvidos na manobra e no “tempo gasto esperando ultrapassar”.

A primeira restrição para ultrapassagens é se o trecho permite esse tipo de manobra, embora zonas proibidas possam ser utilizadas para finalizar a manobra. Caso seja possível, o motorista verifica se ele está sendo ultrapassado ou se já existe um número máximo de veículos usando a faixa oposta, que é de três. Um veículo também é impedido de iniciar uma manobra se houver mais de cinco veículos que precisam ser ultrapassados e não há *gaps* suficientes entre esses veículos. Em seguida, o motorista verifica se há uma distância de visibilidade suficiente para ultrapassagem. Os valores *default* dessas distâncias, assim como a distância mínima para ultrapassagens, são calculados com base no manual americano para projeto de rodovias e de vias urbanas conhecido como *Green Book* (AASHTO, 2001). Por fim, o motorista verifica se o tamanho da zona com permissão de ultrapassagens é suficiente para realização da manobra.

Se há necessidade por ultrapassagens e todas as restrições são atendidas, a manobra deve ser executada em três estágios: (i) inicia-se a ultrapassagem na faixa normal ao aumentar a velocidade; (ii) ocupa a faixa no sentido oposto e acelera até atingir uma velocidade de 20 km/h maior do que o veículo ultrapassado; a distância necessária para ultrapassagem é comparada com a distância para ocorrer uma colisão com o veículo no sentido oposto para decidir se a manobra deve ser abortada ou não; e (iii) retorna à faixa normal seguindo a lógica de mudança de faixa, sendo que nesse momento, o motorista pode considerar ultrapassar mais de um veículo. Quando há faixas adicionais, a rotina usada é diferente: os veículos lentos devem ocupar a faixa da direita, embora isso nem sempre ocorra, o que também pode ser modelado.

### 3.4. Dados de entrada e de saída

De maneira geral, os dados de entrada e de saída do CORSIM e do TWOPAS são semelhantes. Para modelagem das rodovias, é necessário registrar os dados de geometria (alinhamentos vertical e horizontal, distâncias de visibilidade e faixas adicionais); de controle do tráfego (zonas de ultrapassagens permitidas); de características veiculares e dos motoristas; de tráfego (taxas de fluxo, velocidades desejadas e composição veicular); e dos parâmetros de simulação (tempo de simulação e *warm-up*). O usuário do CORSIM pode ainda informar outros dados de entrada que podem tornar a simulação mais realista, como o limite de *headway* que determina um pelotão, o espaçamento mínimo entre veículos sucessivos, a aceleração de ultrapassagem e o tempo necessário para iniciar a manobra (FHWA, 2010; McTrans, 2010).

Existem dados de saída que são comuns aos dois simuladores, como a densidade de veículos em pelotões, a porcentagem de tempo viajando em pelotões, a velocidade média de viagem e número de ultrapassagens realizadas e abortadas. No entanto, o CORSIM permite ainda obter outros resultados de simulações que podem ser usadas como medidas de desempenho da qualidade de serviço. Alguns exemplos desses dados de saída são a velocidade e a distância percorrida pelos veículos enquanto realiza uma ultrapassagem e a proporção de ultrapassagens em locais proibidos em relação às zonas com manobras permitidas (McTrans, 2010).

### 3.5. Documentação e suporte

A documentação e o suporte técnico consistem numa diferença importante entre os dois simuladores avaliados. Enquanto os submodelos de simulação de rodovias de pista simples do CORSIM estão bem documentados no manual do simulador (McTrans, 2010) e em um relatório técnico (Washburn e Li, 2010), as lógicas do TWOPAS, desenvolvidas e atualizadas desde a década de 1970, são pouco relatadas na literatura. Essa dificuldade é comentada em McLean (1989) e até no próprio manual do IHSDM (FHWA, 2010). Existem poucas informações sobre os modelos do TWOPAS, principalmente as lógicas de *car-following* e de aceleração. No caso do CORSIM, o amplo suporte fornecido ao usuários pelo McTrans é fundamental para a solução de dúvidas sobre a correta utilização do software e sobre os submodelos existentes.

Um exemplo dessa diferença ocorre para os dados de saída. Tanto o CORSIM como o TWOPAS fornecem resultados em um determinado intervalo de tempo e em pontos específicos da estrada, mas somente no CORSIM os dados podem ser obtidos desagregados, veículo a veículo (FHWA, 2010; McTrans, 2010). Esse tipo de informação é fundamental para estudar medidas de desempenho alternativas ao uso da *PTSF*, recomendado pelo HCM, mas que é impossível de ser obtido diretamente da observação do tráfego. No TWOPAS, é possível gerar um arquivo de saída chamado TWOSNAP.OUT, em que são fornecidos dados dos veículos presentes na estrada a cada 1 s. No entanto, o arquivo é organizado com base em siglas dos resultados de simulação que, muitas vezes, não podem ser entendidos. A falta de suporte técnico do TWOPAS dificulta encontrar uma solução para esse tipo de problema.

## 4. APLICAÇÃO DOS MODELOS

Juntamente com a comparação dos principais submodelos do CORSIM e do TWOPAS, foi realizada uma aplicação dos simuladores para um conjunto de dados de tráfego de rodovias paulistas. Esse banco de dados, montado a partir de pesquisas anteriores (Egami *et al.*, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr. e Setti, 2010) e de observações realizadas neste trabalho (SP-123), consiste de informações de 12 trechos de rodovias de pista simples coletadas em dois dias distintos para cada trecho, quase sempre durante 4 horas a cada dia. O método de obtenção dos dados consiste em posicionar câmeras de vídeo nas extremidades e em pontos intermediários dos locais (Romana, 1994).

A Tabela 1 resume as informações sobre o tráfego, sendo as porcentagens de veículos em pelotões definidas para veículos com *headways* menores do que 3 segundos. A maior parte dos trechos possui um relevo ondulado, típico do Estado de São Paulo. Em locais onde existem rampas longas e íngremes, como é o caso da SP-255 (do km 139 ao km 145; e do km 162,2 ao km 168,5), as porcentagens de veículos em pelotões tiveram valores médios próximos de 30% mesmo com o fluxo baixo e a presença de faixas adicionais. Nos trechos da SP-98 e da SP-123 esses valores também foram elevados, tendo sido causado pelo alto volume de automóveis. A porcentagem de caminhões variou, principalmente, entre 20% e 35%, em média. A exceção foi a SP-253 (entre o km 151 e o km 155; e o km 161 e o km 168), com valores entre 60% e 75%, devido o trecho ser uma rota de fuga de pedágio pelos caminhoneiros. Outras exceções foram a SP-98 e a SP-123, com uma pequena porcentagem de veículos lentos, geralmente em torno de 3%, em função da grande presença de automóveis.

Tabela 1: Dados de tráfego dos trechos filmados

Data da coleta	Rodovia	Direção (km)	Fluxo (veic/h)	Caminhões (%)	Pelotões (%)	Velocidade média dos caminhões (km/h)	Velocidade média dos automóveis (km/h)
13/02/2004	SP-215	133 - 138,5	115	32%	22%	71	86
		138,5 - 133	98	32%	19%	76	100
21/10/2004		133 - 138,5	123	30%	23%	76	91
		138,5 - 133	137	31%	27%	76	94
21/01/2004	SP-225	113 - 121	144	45%	29%	72	87
		121 - 113	105	33%	22%	72	90
22/10/2004		113 - 121	187	35%	36%	67	81
		121 - 113	173	24%	35%	72	85
23/01/2004	SP-225	133 - 141	93	32%	17%	84	95
		141 - 133	94	24%	22%	65	87
05/11/2004		133 - 141	126	46%	19%	79	91
		141 - 133	94	36%	22%	63	82
30/01/2004	SP-253	151 - 155	118	62%	20%	75	90
		155 - 151	113	65%	26%	87	100
03/11/2004		151 - 155	151	67%	28%	75	87
		155 - 151	156	65%	31%	89	89
12/02/2004	SP-322	382,5 - 388,3	181	23%	31%	71	84
		388,3 - 382,5	169	25%	31%	76	95
04/11/2004		382,5 - 388,3	190	29%	35%	71	87
		388,3 - 382,5	159	35%	34%	69	84
28/10/2004	SP-253	161 - 168	187	75%	27%	71	80
		168 - 161	174	68%	26%	74	82
10/10/2005		161 - 168	157	60%	18%	73	86
		168 - 161	122	52%	20%	77	88
02/12/2004	SP-255	54 - 60	140	36%	23%	70	81
		60 - 54	145	28%	15%	76	92
17/10/2005		54 - 60	154	26%	23%	72	82
		60 - 54	119	23%	16%	72	85
24/11/2005	SP-255	162,2 - 168,5	235	23%	31%	59	81
		168,5 - 162,2	253	23%	31%	67	79
09/12/2005		162,2 - 168,5	237	20%	28%	62	81
		168,5 - 162,2	248	32%	30%	65	75
26/11/2004	SP-318	262 - 266	121	28%	17%	59	81
		266 - 262	104	26%	14%	67	79
21/10/2005		262 - 266	123	27%	19%	62	81
		266 - 262	99	22%	12%	65	75
29/01/2004	SP-255	139 - 145	178	23%	29%	81	91
		145 - 139	203	20%	26%	56	73
14/12/2005		139 - 145	185	27%	26%	75	85
		145 - 139	177	28%	22%	64	87
23/11/2008	SP-98	93,8 - 97,8	112	4%	39%	68	70
		97,8 - 93,8	1137	3%	78%	64	68
07/12/2008		93,8 - 97,8	205	4%	59%	72	76
		97,8 - 93,8	1149	2%	75%	66	69
09/07/2010	SP-123	5,1 - 10,6	812	3%	87%	65	69
		10,6 - 5,1	143	23%	57%	68	74
09/07/2010		7,9 - 13,3	1200	3%	95%	63	64
		13,3 - 7,9	210	6%	65%	64	71

Sendo assim, foram modelados os 12 trechos selecionados, com taxas de fluxo agregadas em intervalos de 15 minutos e 10 replicações para cada corrente de tráfego usando-se diferentes conjuntos de sementes de números aleatórios. Tendo sido coletado toda essa gama de informações, realizou-se uma tentativa de estimar alguns parâmetros de calibração dos simuladores: a velocidade desejada média dos veículos, do TWOPAS, e a velocidade de fluxo livre (*FFS*), do CORSIM. Essas duas variáveis foram tratadas como iguais, sendo que foram adotados valores *default* para os demais parâmetros. Para estimar a *FFS*, que, no caso do TWOPAS, foi representada como a velocidade desejada média dos veículos, foi usado o modelo do HCM2000 calibrado por Mon-Ma (2008):



$$FFS = S_{FM} + 0,0137 \cdot \frac{q}{f_{hv}}, \quad (1)$$

em que:  $S_{FM}$ : velocidade média do campo (km/h);  
 $q$ : fluxo de tráfego bidirecional (veic/h); e  
 $f_{hv}$ : fator de ajuste para os veículos pesados.

O fator de ajuste  $f_{hv}$  é descrito pela relação usada no HCM2010 (TRB, 2010):

$$f_{hv} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1)}, \quad (2)$$

em que:  $P_T$ : proporção de caminhões e ônibus na corrente de tráfego; e  
 $E_T$ : equivalente veicular para caminhões e ônibus, calibrados para condições brasileiras por Egami (2006).

A Figura 1 mostra os resultados das simulações com o TWOPAS e com o CORSIM, para taxas de fluxo em um sentido de todos os trechos estudados. Percebe-se que, em nenhum dos dois casos, o tráfego observado em campo foi reproduzido de maneira satisfatória, mesmo tendo sido realizada uma estimativa da  $FFS$ . Outra análise é mostrada na Figura 2, na qual foi comparada a correlação das velocidades médias de viagem observada e simulada por sentido de tráfego. O coeficiente de correlação linear ( $r$ ) com os valores de velocidade obtidos com o TWOPAS ( $r = 0,42$ ), considerando-se todos os trechos como uma única amostra, apresentou-se um pouco melhor do que os resultados do CORSIM ( $r = 0,31$ ). Uma explicação para essa diferença é o fato de que o TWOPAS tem um modelo mais simplificado, bastante sensível às velocidades desejadas estimadas. O CORSIM, por sua vez, possui um modelo com mais parâmetros de calibração, muitos deles ligados à velocidade de fluxo livre, como elucidado no item 3. Das Figuras 1 e 2, é possível perceber ainda que, na maior parte dos casos, os simuladores superestimam as velocidades médias, o que reflete em valores baixos de  $r$ .

Uma análise estatística também foi realizada a fim de corroborar se há ou não uma correlação linear entre os dados. Nesse caso, o coeficiente  $r$  foi adotado como a estatística de teste, sendo possível calcular os valores críticos dos coeficientes com base no tamanho da amostra  $n$ . Se a hipótese nula for rejeitada, pode-se afirmar que há correlação entre os dados. Se não há condições suficientes para rejeitar a hipótese nula, constata-se que não há correlação linear entre as informações (Triola, 2005). Usando um nível de significância de 5%, a análise foi realizada considerando-se cada trecho de estrada como uma população de correntes de tráfego distinta. Os resultados obtidos mostraram que somente em 50% dos trechos simulados com o TWOPAS pode-se afirmar que há correlação entre os dados. No caso do CORSIM, esse valor foi de 42%.

O método adotado neste trabalho serviu para mostrar que os dois simuladores necessitam ser calibrados. Isso porque os valores de  $r$  obtidos são considerados baixos quando se trata de calibração de simuladores de tráfego microscópicos, e principalmente quando se compara velocidades, que possui uma variabilidade bem menor do que outras medidas de desempenho, como a porcentagem de veículos em pelotões.

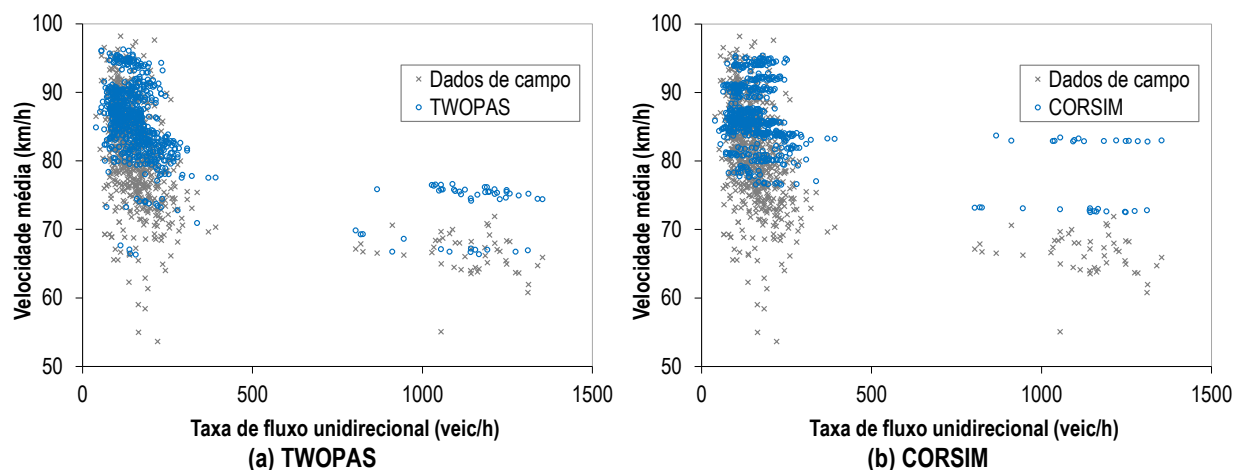


Figura 1: Resultados das simulações para o conjunto de trechos estudados

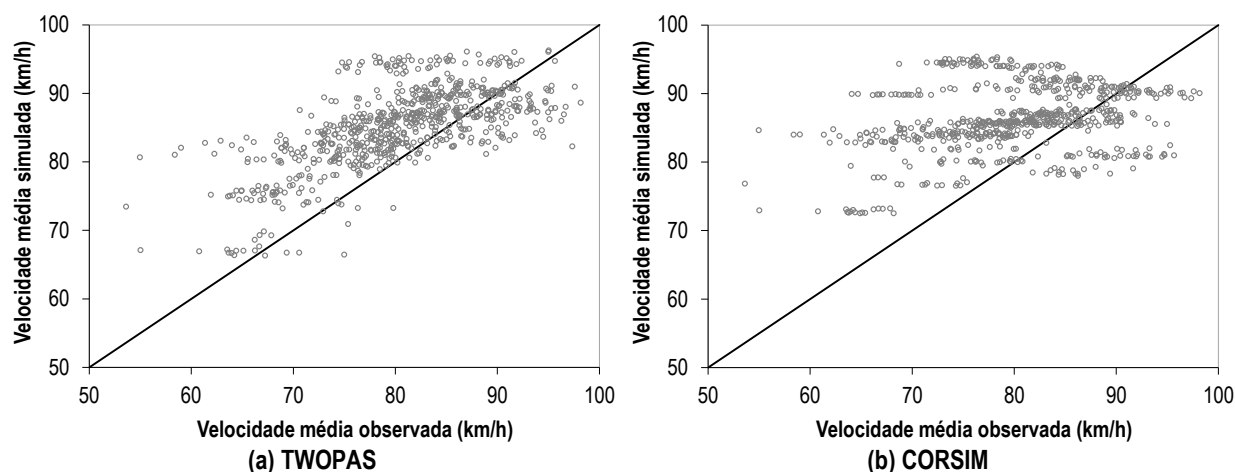


Figura 2: Correlação entre as velocidades médias de viagem observadas e simuladas para o conjunto de trechos estudados

Para uma boa representação das correntes de tráfego nos simuladores, não basta estimar os parâmetros de calibração ligados à velocidade de fluxo livre. Outros parâmetros desse tipo afetam bastante os experimentos de simulação, como aqueles ligados aos modelos de *car-following* e de mudança de faixa, à agressividade dos motoristas e ao desempenho dos veículos. No caso do TWOPAS, Mon-Ma (2008) constatou, por meio de uma análise de sensibilidade, que parâmetros desse tipo têm uma influência significativa nas medidas de desempenho. Por analogia, deve-se esperar que o mesmo ocorre com o CORSIM, o que explica os resultados supracitados. Dessa forma, ressalta-se que o principal desafio no uso de simuladores de tráfego é, de fato, desenvolver uma ferramenta para a calibração e validação dos softwares.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dois simuladores abordados possuem vantagens específicas quanto aos seus submodelos. No caso das velocidades desejadas, o TWOPAS estipula uma distribuição para cada tipo de veículo e para cada sentido do tráfego. Por sua vez, não é possível associar diferentes distribuições ao longo de um único trecho, o que pode ser feito no CORSIM. Sobre a lógica de *car-following*, existe pouca documentação que explique o modelo do TWOPAS, enquanto que o CORSIM se vale de uma lógica que vem sendo usada, inclusive, para outros tipos de estradas. Os modelos de ultrapassagens dos dois simuladores são semelhantes, embora, mais uma vez,

a documentação disponível seja mais abrangente para o CORSIM.

Com base na revisão da literatura, o CORSIM parece ser mais adequado do que o TWOPAS para desenvolver um método de avaliação da qualidade de serviço em rodovias de pista simples. Os motivos que levam à essa conclusão são:

- Documentação mais abrangente, tanto do ponto de vista da disponibilidade de relatórios técnicos quanto de manuais para a correta utilização do software;
- Suporte técnico para solução de dúvidas e sobre as rotinas do simulador;
- Possibilidade de modelagem de situações efetivamente ocorridas em campo, como a utilização de locais proibidos para finalizar manobras de ultrapassagens e a possibilidade de modelar interseções, inclusive com outros tipos de estradas;
- Maior número de dados de entrada; alguns são parâmetros que, uma vez calibrados, podem representar o comportamento do motorista/veículo de maneira mais realista;
- Atualização das simulações a cada 0,1 s; essa atualização é feita a cada 1 s no TWOPAS; essa diferença pode representar uma maior precisão nos resultados das simulações, especialmente aquelas com maior variabilidade, como é o caso da porcentagem de veículos em pelotões; e
- Maior quantidade de dados de saída e obtenção de dados por veículo, condições fundamentais para estudar medidas de desempenho da qualidade de serviço nas rodovias.

Com a indicação de que o CORSIM é o mais adequado, vale ressaltar a necessidade de calibração do simulador, como mostra os testes realizados neste artigo. Uma técnica que vem sendo usada com esse objetivo é o algoritmo genético, um procedimento iterativo de otimização que vem sendo aplicado para calibrar simuladores de rodovias de pista simples (Egami *et al.*, 2006; Bessa Jr. e Setti, 2010). Para calibrações futuras, recomenda-se ainda usar medidas de desempenho que possam ser observadas diretamente do tráfego, como a velocidade média de viagem e a porcentagem de veículos em pelotões. Além disso, deve ser avaliada a dispersão dessas variáveis, ao invés de comparar somente os valores médios obtidos em campo e por simulação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FAPESP e do CNPq, pelo suporte financeiro sob a forma de bolsas de doutorado e de produtividade em pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- AASHTO (2001) *A policy on geometric design of highways and streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Fourth Edition, Washington, D.C., 2001.
- Al-Kaisy, A. e C. Durbin (2007) Estimating percent time spent following on two-lane highways: field evaluation of new methodologies. *TRB Annual Meeting CD-ROM*, National Research Council, Washington, D.C.
- Araújo, J. J. (2007) *Estudo do impacto de veículos pesados sobre a infra-estrutura rodoviária através de simulação microscópica de tráfego*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- Bessa Jr., J. E. e J. R. Setti (2010) Produção de dados de tráfego sintéticos através de algoritmo genético e simulação microscópica. *Revista Transportes*, v. 18, p. 13–24.
- Bessa Jr., J. E. (2009) *Caracterização do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples do estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- Botha, J. L.; X. Zeng e E. C. Sullivan (1993) Comparison of performance of TWOPAS and TRARR models when simulating traffic on two-lane highways with low design speeds, *Transportation Research Record*, v. 1398, p. 7–16.
- Cunha, A. L. B. N. (2007) *Avaliação do impacto da medida de desempenho no equivalente veicular de caminhões*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- Cunto, J. F. C. e C. F. G. Loureiro (2010) O uso da microsimulação na avaliação do desempenho da segurança viária. *Anais do XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Salvador, BA, CD-ROM.

- Egami, C. Y. (2006) *Adaptação do HCM-2000 para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Egami, C. Y.; M. L. Mon-Ma; J. R. Setti e L. R. Rilett (2006) Automatic calibration of two-lane highway traffic simulation models using a genetic algorithm. *Proceedings of 9th International Conference – Applications of Advanced Technologies in Transportation*. ASCE. p. 510–515. Chicago, Illinois.
- FGSV (2005) *Handbuch zur Bemessung von Strassenverkehrsanlagen 2001* (HBS, German Highway Capacity Manual 2001). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Cologne.
- FHWA (2010) *Traffic Analysis Module (TAM) Engineer's Manual – Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM)*. Federal Highway Administration (FHWA).
- Halati, A.; H. Lieu e S. Wlaker (1997) CORSIM – Corridor traffic simulation model. In: Traffic congestion and traffic safety in the 21<sup>st</sup> century: challenges, innovations and opportunities, Chicago. *Proceedings...* Chicago: American Society of Civil Engineering, p.570–576.
- Harwood, D. W.; A. D. May; I. B. Anderson; L. Leiman e A. R. Archilla (1999) *Capacity and quality of service of two-lane highways*. Final Report, NCHRP Project 3-55 (3). MRI, Kansas City, Mo.
- Hoban, C. J.; R. J. Shepherd; G. J. Fawcett e G. K. Robinson (1991) *A model for simulating traffic on two-lane rural roads* – User guide and manual for TRARR Version 3.2, Victoria, Australia, AARB.
- Kim, K. e R. L. Rilett (2001) Genetic algorithm based approach for calibration microscopic simulation models. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, Oakland, CA, USA, p. 698–704.
- Leiman, L.; A. R. Archilla e A. May (1998) *Capacity and quality of service of two-lane highways*. NCHRP Project 3-55 (3). Task 6 – Enhance, calibrate, and validate the selected simulation model, TWOPAS model improvements. Midwest Research Institute, Kansas City, Mo.
- McLean, J. R. (1989) *Two-lane highway traffic operations – Theory and practice*. Transportation Studies, v.11. Gordon and Preach Science Publishers, Amsterdam.
- McTrans (2010) *CORSIM – User's Guide*. TSIS Version 6.2, McTrans, University of Florida.
- Messer, C. J. (1986) *Two-lane, two-way rural highway capacity*, Final Report of NCHRP Project 3-28A, Texas Transportation Institute.
- Mon-Ma, M. L. (2008) *Adaptação do HCM-2000 para rodovias de pista simples com faixas adicionais típicas do Estado de São Paulo*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- Romana, M. G. (1994). *Evaluación práctica de niveles de servicio em carreteras convencionales de dos carriles em España*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Civil – Transportes, de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Schultz, G. G. e L. R. Rilett (2004) Analysis of distribution and calibration of car-following sensitivity parameters in microscopic traffic simulation models. *Transportation Research Record*, v. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C, p. 41–51.
- Tapani, A. (2005) Versatile model for simulation of rural road traffic. *Transportation Research Record*, v. 1934, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 169-178.
- TRB (1985) *Highway Capacity Manual – Special Report 209*. Transportation Research Board. Washington D.C.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual 2000*. Transportation Research Board. Washington D.C.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual 2010*. Transportation Research Board. Washington D.C.
- Triola, M. F. (2005) *Introdução à Estatística*, 9ª edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ.
- Washburn, S. e J. Li (2010) *Development of a simulation program for two-lane highway analysis*. Center for Multimodal Solutions for Congestion Mitigation (CMS), CMS Proj. Nr: 2008-002, Gainesville, FL, EUA.

*Endereço para contato:*

MSc. José Elievam Bessa Júnior (jebessa@sc.usp.br ou elievam@yahoo.com.br)  
MSc. André Luiz Barbosa Nunes da Cunha (acunha@sc.usp.br ou eng.andrecunha@gmail.com)  
Prof. Dr. José Reynaldo Setti (jrasetti@usp.br)  
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Depto. de Engenharia de Transportes  
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – São Carlos, SP, 13566-590