

# ESTUDO DAS RELAÇÕES ENTRE FLUXO E VELOCIDADE EM AUTOESTRADAS E RODOVIAS DE PISTA DUPLA PAULISTAS

Gustavo Riente de Andrade

José Reynaldo Setti

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

## RESUMO

Este trabalho objetiva caracterizar as relações fundamentais de tráfego para rodovias de pista dupla e autoestradas do estado de São Paulo obtendo, como produto final, valores representativos para a capacidade de tráfego e um conjunto de curvas fluxo-velocidade que possam substituir as do HCM na avaliação do nível de serviço e capacidade em autoestradas e rodovias de pista dupla no estado de São Paulo. Para tanto, será calibrado um modelo empírico, baseado em observações de fluxo e velocidade, obtidas por estações selecionadas dentre um conjunto de 76 pontos de coleta, para os quais existem dados estratificados por categoria veicular e por faixa de tráfego. Por fim, será conduzida uma análise comparativa entre os modelos calibrados para as rodovias classificadas como autoestradas e para rodovias de pista dupla convencionais, segundo os critérios do HCM.

## ABSTRACT

The objective of the research is to study the fundamental traffic relationships for freeways and multilane highways in the state of São Paulo, in order to obtain a set of speed-flow curves and capacity values that could replace those given in the HCM for level of service and capacity estimation for freeways and multilane highways in the state of São Paulo. To achieve this, an empirical model will be calibrated, using traffic flow and speed data obtained by stations selected among a set of 76 sites, for which traffic data, disaggregated by vehicle type and lane, are available. Finally, a comparative analysis will be conducted between the model calibrated to roads classified as freeways and multilane highways, according to the HCM criteria.

## 1. INTRODUÇÃO

Os procedimentos do *Highway Capacity Manual* (HCM) foram concebidos a partir das características observadas nas rodovias norte-americanas, de forma que o manual recomenda sua adaptação às condições locais de cada região no qual for utilizado (TRB, 2010). Em decorrência dessa afirmação, vários autores e instituições vêm recomendando a adaptação do HCM às condições das rodovias do país (Demarchi, 2000; Egami e Setti, 2006; DNIT, 2006, p. 263; Riente *et al.*, 2008; Setti, 2009; TCU, 2008).

Dentre os aspectos a serem considerados em uma adaptação do HCM ao ambiente viário brasileiro, inclui-se a definição das condições ideais em rodovias, seguida pela determinação da capacidade de tráfego nessas condições (Setti, 2009). O conceito de capacidade é definido pelo HCM como a maior taxa de fluxo horária sob a qual veículos conseguem passar por um dado ponto ou seção durante certo período de tempo, sob condições usuais de tráfego e da via (TRB, 2010, p. 4-17). Esse aspecto está diretamente atrelado às medidas de desempenho que caracterizam a corrente de tráfego e são utilizadas para determinar o nível de serviço. Para autoestradas e rodovias de pista dupla, a principal medida usada pelo HCM é a densidade, ligada à velocidade média de percurso e ao fluxo de tráfego por meio de curvas empíricas fluxo-velocidade, que refletem o desempenho dos veículos e o comportamento dos motoristas em um dado local.

## 2. META E OBJETIVOS

Buscando fornecer subsídios para a adaptação do HCM às rodovias brasileiras, este trabalho tem como meta produzir um conjunto de curvas fluxo-velocidade que possam substituir as do HCM em estudos de avaliação do nível de serviço, bem como valores representativos para a

capacidade em rodovias de pista dupla e autoestradas brasileiras. De modo a atingir essa meta, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar os trechos homogêneos de rodovias de pista dupla e autoestradas nos quais se dispõem de dados de tráfego e identificar os trechos candidatos a produzir dados adequados à calibração de um modelo que relacione fluxo e velocidade de tráfego;
2. Obter um conjunto representativo e de dados de tráfego para os trechos selecionados;
3. Propor um modelo que descreva a relação fluxo-velocidade e a capacidade de tráfego, calibrado para condições físicas e operacionais variadas, a partir dos dados disponíveis;
4. Verificar se a diferença entre a relação fluxo-velocidade calibrada para autoestradas e rodovias de pista dupla é significativa; e
5. Comparar a capacidade e as relações fluxo-velocidade produzidas com as propostas pelo HCM.

### **3. MÉTODO PROPOSTO**

De modo a atingir a meta e objetivos específicos do trabalho, é proposto um método constituído pelas etapas descritas a seguir.

#### **3.1. Revisão bibliográfica**

Na primeira etapa do método, é empreendida uma revisão bibliográfica, com consulta a livros, manuais e artigos publicados em congressos e periódicos, com enfoque no estado da arte no que se refere ao tema estudado. A revisão abrange os conceitos fundamentais a respeito das principais variáveis macroscópicas de tráfego e sua interrelação. São abordados modelos atuais que descrevem a relação entre o fluxo e a velocidade média da corrente de tráfego em rodovias de pista dupla e autoestradas.

Dentre os modelos pesquisados, é dirigida especial atenção ao apresentado pelo Highway Capacity Manual (Schoen *et al.*, 1995; Roess, 2009; TRB, 2010), incluindo sua evolução até sua edição atual e recomendações por parte dos autores envolvidos na elaboração do manual para estudos futuros (Roess, 2011a; Roess, 2011b). São apresentados também modelos alternativos (Van Aerde, 1995; Demarchi e Setti, 2000; Brilon; Lohoff, 2011), bem como o progresso das adaptações do manual americano às condições brasileiras até então, no que abarca o tema deste trabalho (Demarchi, 2000; Cunha, 2007). A revisão contém ainda possíveis métodos para a determinação de valores representativos para a capacidade de tráfego (Bassan e Polus, 2010; Washburn *et al.*, 2010) e calibração de um modelo fluxo-velocidade (Setti; Demarchi, 2000; Rakha e Arafeh, 2010; Roess, 2011b; Sun *et al.*, 2010).

#### **3.2. Caracterização e classificação dos trechos estudados**

Nesta etapa, são caracterizados e classificados os trechos homogêneos nos quais há a possibilidade de obtenção de dados de tráfego, a partir de um conjunto inicial composto por 76 pontos de coleta candidatos. Inicialmente, será montado um banco de dados a partir de informações advindas de múltiplas fontes contendo, para cada trecho considerado para análise, as características físicas e operacionais que podem afetar as variáveis do modelo a ser calibrado, segundo os critérios do HCM.

A partir da análise do banco de dados, são descartados os trechos que se mostrem inadequados aos objetivos deste estudo, tais como: (1) aqueles que não possam ser classificados como segmentos de fluxo não interrompido de autoestradas ou rodovias de pista dupla; (2) trechos com configuração e características físicas fora do escopo do HCM.

### 3.3. Coleta e tratamento dos dados de tráfego

A calibração de um modelo que descreva a relação fluxo-velocidade depende da disponibilidade de dados de tráfego. Os dados necessários são fornecidos pela ARTESP e pelas concessionárias CCR RodoAnel e CCR ViaOeste, e são coletados ininterruptamente por laços indutivos instalados nos trechos selecionados. Os dados a serem utilizados contêm medidas do fluxo e da velocidade do tráfego, divididos por faixa e entre veículos de passeio e pesados.

Após a sua obtenção, os dados são tratados, de modo a eliminar as observações que, se mostrem inadequadas ao estudo, segundo os critérios do HCM. São descartados dados referentes à operação atípica, fluxo congestionado ou sob influência de filas formadas a jusante do ponto de coleta. Em seguida, as observações dos pontos de coleta selecionados são segregadas entre trechos de autoestrada e rodovias de pista dupla. Por fim, é calculada a velocidade de fluxo livre *FFS* de cada trecho. No método do HCM, a *FFS*, que representa a velocidade média dos automóveis em condições de fluxo livre, é um parâmetro chave para a calibração de diferentes curvas fluxo-velocidade, representativas de condições físicas e operacionais variadas (Roess, 2011b).

### 3.4. Modelo fluxo-velocidade e método de calibração escolhidos

A partir da revisão bibliográfica e do tratamento da base de dados, é definido e detalhado o modelo que descreva a relação fluxo-velocidade e a capacidade de tráfego a calibrar, bem como as condições de contorno e o método escolhido para o ajuste dos parâmetros desse modelo. Com o objetivo de fornecer contribuições com relação ao tema pesquisado, o método de calibração proposto nesta etapa deve incorporar recomendações tecidas por outros pesquisadores, a partir de problemas encontrados em outros estudos (Roess, 2009; Roess, 2011b).

### 3.5. Relação fluxo-velocidade e capacidade

Nesta etapa, é proposto um modelo que defina a capacidade e diversas curvas fluxo-velocidade em função da velocidade de fluxo livre *FFS*. É conduzida também uma análise comparativa entre o modelo calibrado para rodovias classificadas como autoestradas e rodovias de pista dupla convencionais (respectivamente, *freeways* e *multilane highways*, como definido pelo HCM). Os resultados dessa comparação permitem uma discussão acerca da necessidade do desenvolvimento de procedimentos distintos para a avaliação do nível de serviço em autoestradas e rodovias de pista dupla brasileiras.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo visa propor valores representativos para a capacidade e um conjunto de curvas fluxo-velocidade para autoestradas e rodovias de pista dupla do estado de São Paulo. Até o presente, foi feita a revisão da literatura, que abarcou os principais modelos que descrevem a capacidade de tráfego e a relação fluxo-velocidade, com especial enfoque no modelo do HCM. Foram descritas também as formas usuais para a determinação de valores representativos para a capacidade e calibração de modelos fluxo-velocidade. Em seguida, foi desenvolvido um método para a caracterização de trechos homogêneos rodoviários, usado para selecionar aqueles candidatos a produzir dados adequados ao estudo. Por fim, foi elaborado um método para o tratamento dos dados de tráfego, para os trechos pré-selecionados. Como resultado do processo de tratamento empreendido, dos 76 pontos de coleta iniciais, 26 se mostraram efetivamente adequados a serem usados para a calibração de um modelo fluxo-velocidade e capacidade.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da ARTESP, CCR RodoAnel, CCR AutoBan e CCR ViaOeste, que disponibilizaram os dados de tráfego. Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, através de uma bolsa de mestrado e uma bolsa de produtividade em pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bassan, S.; Polus, A. (2010) Meaning of Actual Capacity of Freeways and its Estimation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 37, p. 77–87.
- Brilon, W.; Lohoff, J. (2011) Freeway Flow Models. *90<sup>th</sup> Annual Meeting of the TRB* Washington, DC (CD-ROM).
- Cunha, A. L. B. N. (2007) *Avaliação do Impacto da Medida de Desempenho no Equivalente Veicular de Caminhões*. Dissertação (mestrado), EESC-USP, São Carlos, SP.
- Demarchi, S. H. (2000) *Influência dos Veículos Pesados na Capacidade e Nível de Serviço de Rodovias de Pista Dupla*. Tese (doutorado), EESC-USP, São Carlos, SP.
- DNIT (2006) *Manual de Estudos de Tráfego*: Publicação IPR-723. Rio de Janeiro.
- Egami, C. Y.; Setti, J. R. (2006) Adaptação do HCM 2000 para rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil. *Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Brasília, DF (CD-ROM).
- Rakha, H.; Arafeh, M. (2010) Calibrating Steady-State Traffic Stream and Car-Following Models Using Loop Detector Data. *Transportation Science*, v. 44, n. 2, p. 151-168.
- Riente, G.; Rodrigues-Silva, K. C.; Gouvêa, R. G. (2008) Aplicabilidade das Metodologias Rodoviárias do Highway Capacity Manual 2000 no Brasil. *Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Fortaleza, CE (CD-ROM).
- Roess, R. P. (2009) *Re-Calibration of the 75-mi/h Speed-Flow Curve and the FFS Prediction Algorithm for HCM 2010*. Research Memorandum, NCHRP Project 3-92. Polytechnic Institute of New York University, Brooklyn, N. Y.
- Roess, R. P. (2011a) Speed-Flow Curves for Freeways in the HCM: A Historical Perspective. *90<sup>th</sup> Annual Meeting of the TRB*, Washington, DC (CD-ROM).
- Roess, R. P. (2011b) Speed-Flow Curves for Freeways in the 2010 HCM. *90<sup>th</sup> Annual Meeting of the TRB*, Washington, DC (CD-ROM).
- Schoen, J.; May, A.; Reilly, W.; Urbanik, T. (1995) *Speed-Flow Relationships for Basic Freeway Segments, Final Report*, NCHRP Project 3-45, JHK & Associates, Tucson AZ.
- Setti, J. R. (2009) Highway Capacity Manual ou Manual de Capacidade Viária? *Anais do 6º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C 2009*, Florianópolis, SC (CD-ROM).
- Setti, J. R.; Demarchi, S. H. (2000) Calibração da curva fluxo-velocidade-densidade para rodovias de pista dupla brasileiras. *Anais do XI Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transportes*, Gramado, RS.
- Sun, L.; Yang, J.; Mahmassani, H.; Gu, W.; Kim, B. J. (2010) Data Mining-Based Adaptive Regression for Developing Equilibrium Speed-Density Relationships. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 37, p. 389-400.
- TCU. (2008) *Acórdão 2104/2008 Plenário, processo n. 016.189/2008-9*. Tribunal de Contas de União. Entidade: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Ministro relator: Ubiratan Aguiar. 26/9/2008. Disponível em: <portal2.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/detalhes\_noticias?noticia=777746>. Acessado em: 7/7/2009.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual 2010*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Van Aerde, M.; Rakha, H. (1995) Single Regime Speed-Flow Density Relationship for Congested and Uncongested Highways. *74<sup>th</sup> Annual Meeting of the TRB*, Paper 950802, Washington, D.C.
- Washburn, S. S.; Yin, Y.; Modi, V.; Kulshrestha, A. (2010) *Investigation of Freeway Capacity, Part B: Freeway Capacity Estimation for Florida Freeways, Final Report*. Transportation Research Center, University of Florida, Tallahassee, Florida.

Prof. Dr. José Reynaldo Setti (jrasetti@usp.br)  
Gustavo Riente de Andrade, aluno de mestrado (guriente@usp.br)  
Universidade de São Paulo  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia de Transportes  
Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, CEP 13.566-590