

PLANO DE TRABALHO

1. CONCESSIONÁRIA

CONCESSIONÁRIA DA BR-040 S.A.

End.: Rua Niágara, 350 – Jardim Canadá - Nova Lima/MG

Responsável Técnico:

José Elievam Bessa Júnior (elievamjr@gmail.com)

Equipe de apoio:

Pedro Nogueira (Pedro.nogueira@via040.invepar.com.br)

Diego Milli (diego.milli@via040.invepar.com.br)

Aline Ferreira Andalicio (aline.andalicio@via040.invepar.com.br)

2. DESCRIÇÃO DO PROJETO

2.1. TÍTULO DO PROJETO

MÉTODO PARA CÁLCULO DO NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES: DESENVOLVIMENTO A PARTIR DE DADOS DA RODOVIA BR-040

2.2. OBJETIVO

Este projeto tem como meta principal desenvolver um método adequado para calcular o nível de serviço em rodovias de pista simples, tendo, como base, os dados de trechos de rodovias de pista simples sob concessão da Via040. Para que esta meta seja atingida, propõe-se que os seguintes objetivos específicos sejam alcançados:

- Obter um conjunto de dados de tráfego representativo de diversas condições operacionais de trechos de rodovias de pista simples;
- Selecionar um simulador de tráfego para rodovias de pista simples que forneça as informações necessárias para subsidiar o desenvolvimento do método e obter uma versão recalibrada capaz de reproduzir a operação dos trechos estudados com um grau de fidelidade adequado;
- Estudar as relações entre o fluxo de tráfego e as medidas de desempenho que caracterizem o comportamento das rodovias de pista simples brasileiras;
- Estudar o efeito sobre a qualidade de serviço de características da via, como as faixas adicionais e as zonas de ultrapassagens proibidas;
- Propor critérios para estimar o nível de serviço baseado em medidas de desempenho que possam ser obtidas diretamente da observação da corrente de tráfego.

3. JUSTIFICATIVA

O transporte rodoviário tem um papel fundamental em todos os aspectos da sociedade brasileira, unindo mercados e integrando regiões e estados. Isso pode ser comprovado verificando-se a composição da matriz de transportes do Brasil: apesar do crescimento das demais modalidades ao longo das últimas décadas, cerca de 85% da carga e 56% dos passageiros transportados entre novembro de 2008 e outubro de 2009 usaram o modo rodoviário (FIPE, 2010).

A Via 040 trecho com 936,8 km da rodovia BR-040, entre Brasília/DF e Juiz de Fora/MG, interliga duas importantes regiões do país (Sudeste ao Centro Oeste) e se destaca pela relevância estratégica para o desenvolvimento da economia brasileira. Inúmeras empresas nacionais e estrangeiras instaladas às margens da Via 040 ou em cidades próximas vêm investindo pesados aportes na ampliação de suas unidades, com geração de empregos diretos e indiretos. A rodovia também faz ligação com outros importantes eixos produtores. Ao elevado volume de tráfego de caminhões (transporte de cargas), soma-se a movimentação de ônibus e veículos de passeio resultante de transportes de diferentes naturezas, desde negócios até turismo. É de suma importância para o escoamento da produção e transportes diversos, que as condições funcionais e estruturais da rodovia garantam a agilidade e segurança do tráfego.

A limitação dos recursos disponíveis para expansão da rede rodoviária e a necessidade de utilizá-la da forma mais eficiente possível requer estimativas da qualidade do serviço e da capacidade dos seus componentes individuais. No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) usa o Highway Capacity Manual 2000 (TRB, 2000) para analisar as condições operacionais em rodovias e determinar a necessidade de realização de obras de melhoramento (DNIT, 2006). O HCM2000 também é utilizado por outras agências públicas, como a ARTESP (Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo), no estado de São Paulo (ARTESP, 2002).

Apesar de ser bastante usado no mundo inteiro, o HCM2000 é, muitas vezes, aplicado sem que nenhuma adaptação às condições locais seja realizada, apesar do próprio manual advertir que isso deva ser feito (TRB, 2000, p. 1-2): “o usuário deve sempre ter em mente que a maior parte da pesquisa básica, os valores default e as aplicações típicas dizem respeito à América do Norte e, particularmente, aos EUA. Embora haja indubitável valor nos métodos apresentados, sua aplicação fora da América do Norte requer uma ênfase adicional na adaptação de equações e processos para condições locais”.

Dentre essas condições distintas, destaca-se a forma de condução dos motoristas (agressividade, obediência às regras de trânsito), as características dos veículos (tamanho, potência, massa) e a composição veicular (DNIT, 2006).

A importância de uma adaptação do HCM2000 foi enfatizada pelo Tribunal de Contas da União (TCU) à época da concessão da BR-116 e da BR-324, quando recomendou à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) que fossem realizados ajustes nos fatores para que refletissem a realidade brasileira (TCU, 2008). Mesmo que algumas adaptações tenham sido realizadas, a maior parte delas não tem um embasamento técnico-científico desejável, o que leva a obtenção de resultados que podem tanto subestimar ou superestimar a qualidade de serviço percebida pelos usuários da via (Setti, 2009). Dessa forma, pode-se constatar a necessidade de se criar uma versão brasileira do HCM – um “Manual de Capacidade Viária”, desenvolvido a partir de estudos realizados em rodovias brasileiras.

Deve-se ressaltar que essa necessidade não é exclusiva do Brasil, visto que o HCM já foi adaptado para diversos países, para melhor refletir as particularidades locais. As adaptações podem incluir até mesmo uma completa modificação do processo de estimativa, como é o caso dos métodos para estimar nível de serviço de rodovias de pista simples usados na Alemanha (FGSV, 2001) e na África do Sul (Van As, 2003).

O desenvolvimento de uma versão local do Manual de Capacidade Viária deve considerar pelo menos três aspectos essenciais: (i) a definição de trecho com condições ideais e a sua capacidade; (ii) as medidas de desempenho que melhor refletem a relação entre a qualidade de serviço e as condições operacionais para trechos de rodovias com condições ideais e não ideais; e (iii) o efeito dos veículos pesados sobre a capacidade e a qualidade de serviço (Setti, 2009).

Alguns estudos encontrados na literatura, sobretudo aqueles liderados pelo Prof. Dr. José Reynaldo Setti, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), têm procurado produzir conhecimentos e resultados que subsidiem o desenvolvimento de um Manual de Capacidade para o Brasil. Os estudos conduzidos até agora focalizam-se em rodovias rurais (autoestradas, rodovias de pista dupla e de pista simples) e visaram ou adaptar os métodos do HCM para as condições viárias brasileiras ou mesmo buscar um método alternativo ao HCM.

Um dos primeiros pontos estudados foi a adaptação do método proposto pelo HCM2000 para a análise de rodovias de pista simples. As adaptações realizadas por Egami (2006) e por MonMa (2008) foram desenvolvidas a partir da premissa que a estrutura do HCM2000 deveria ser modificada apenas no estritamente necessário. Consequentemente, os experimentos realizados para elaborar o capítulo 20 do HCM2000 (Harwood et al., 1999) foram replicados usando-se simuladores recalibrados para representar uma rodovia típica paulista. Foram mantidas as formas gerais das relações fundamentais, bem como as medidas de desempenho usadas para determinar o nível de serviço. Os dados coletados para a calibração e a validação dos simuladores utilizados eram limitados por uma faixa de fluxo bem abaixo da capacidade das rodovias selecionadas, uma vez que, na época, praticamente inexistiam estações permanentes de coleta de dados de tráfego em rodovias de pista simples. Apesar de alguns problemas

terem sido identificados durante o seu desenvolvimento, as adaptações propostas mostraram-se capazes de estimar a qualidade de serviço com uma precisão muito superior à obtida com o uso do HCM2000 (Utimura et al., 2007; Mon-Ma, 2008).

Os problemas encontrados na adaptação do HCM2000 para rodovias de pista simples do estado de São Paulo levaram Egami (2006) e Mon-Ma (2008) a ressaltar que, além da necessidade de se obter conjuntos de dados mais representativos de toda a gama de condições operacionais, seria necessário realizar estudos mais detalhados sobre: (i) as relações fundamentais do tráfego; (ii) os diversos fatores de ajuste; e, (iii) as medidas de desempenho mais adequadas para refletir a qualidade de serviço em rodovias no Brasil. A importância da continuidade dessa linha de pesquisa foi também ressaltada, bem como a necessidade de acompanhar as alterações nas características do fluxo de tráfego. Por exemplo, na época em que aqueles estudos foram realizados, combinações de veículos de carga foram detectadas, mas numa fração bastante pequena. A disseminação deste tipo de veículo pesado pode modificar consideravelmente a composição veicular e implicaria em recalcular os fatores de equivalência dos caminhões.

Com base nessas recomendações, Bessa Jr. (2009) ampliou o conjunto de dados usados nessas pesquisas anteriores, observando trechos com fluxos consideravelmente mais altos e incorporando dados de tráfego coletados por sensores permanentes instalados pelo DER-SP. Os resultados desse estudo sugerem que outros modelos das relações fundamentais de tráfego representariam melhor as condições operacionais das rodovias paulistas do que modelos com estrutura similar à dos usados no HCM2000.

Diversos autores (Van As, 2003; Polus e Cohen, 2009; Yu e Washburn, 2009) discutem a dificuldade em obter medidas de desempenho do fluxo de tráfego a partir de dados coletados em campo. Entre as recomendações da literatura, destaca-se a necessidade de propor medidas de desempenho que possam ser determinadas através da observação de parâmetros da corrente de tráfego (fluxo, headways, velocidades, etc.). Em particular, a porcentagem de tempo viajando em pelotões (PTSF), como definida no HCM e usada para determinar o nível de serviço, é um parâmetro impossível de ser coletado diretamente do tráfego.

Com base nisso, Bessa Jr. (2015) estudou a possibilidade de determinar a qualidade do serviço usando medidas de desempenho obtidas diretamente da observação da corrente de tráfego. Diversas variáveis sugeridas na literatura foram testadas e os resultados obtidos sugerem que a PTSF não é recomendada para calcular o Nível de Serviço em rodovias de pista simples. Para isso, outras duas medidas de desempenho – a densidade para automóveis e a densidade de veículos em pelotões – aparentam ser mais adequadas para obtenção do nível de serviço (com base nos resultados encontrados a partir de dados coletados em rodovias paulistas e mineira).

Ainda que estes três estudos (Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr., 2009) tenham produzido avanços consideráveis na adaptação do HCM2000 para rodovias no

Brasil, os resultados obtidos mostram que essa base de conhecimentos ainda necessita ser expandida para fornecer subsídios suficientes para o desenvolvimento de um Manual de Capacidade Viária para rodovias de pista simples brasileira, o que, em parte, parte foi feito por Bessa Jr. (2015). Assim sendo, este projeto visa dar continuidade a essa linha de pesquisa.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1. HIGHWAY CAPACITY MANUAL 2010

O Highway Capacity Manual 2010 (TRB, 2010) é a quinta edição do manual que é a principal referência no mundo para análise da capacidade e do nível de serviço de diversos componentes viários, como as rodovias de pista simples. Em relação à versão anterior, publicada em 2000 (TRB, 2000), o HCM2010 acrescentou mais conteúdo, especialmente devido às revisões a que o manual foi submetido para que fosse melhor entendido e aplicado pelos usuários. Os experimentos realizados para desenvolver os métodos para avaliar rodovias de pista simples são os mesmos do HCM2000, desenvolvidos como parte do National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 3-55(3) (Harwood et al., 1999) e revisados como parte do NCHRP Project 20-7(160) (Harwood et al., 2003).

As principais alterações no método do HCM2010 para avaliar rodovias de pista simples, em relação ao método do HCM2000, foram: (i) a extinção da análise bidirecional; para isso, é necessário usar a análise unidirecional e combinar as medidas de desempenho para avaliar segmentos de rodovias em ambas as direções; (ii) a reorganização de alguns modelos e tabelas; (iii) o acréscimo de uma terceira classe de rodovias, voltadas para regiões urbanizadas; e (iv) o acréscimo do método para determinar o nível de serviço em faixas voltadas para ciclistas. Os itens (i) e (ii), por serem mais relacionados com a meta deste trabalho, são abordados nas seções a seguir.

No caso de rodovias de pista simples, as medidas de serviço – ou medidas de desempenho da qualidade de serviço – diferem das adotadas na análise de freeways e de rodovias de pista dupla, que usam a densidade. Em rodovias de pista simples, ultrapassagens e mudanças de faixa somente são possíveis quando existe visibilidade suficiente no sentido oposto para realização das manobras. Quando não é possível, a mobilidade é comprometida, gerando desconforto para motoristas que permanecem atrás de um veículo mais lento.

Esse tipo de rodovia compõe a maior parte da malha viária dos países, servindo como um componente que promove, principalmente, a mobilidade. Em alguns casos, a acessibilidade é a meta, não sendo importante desenvolver altas velocidades. Por essas razões, o HCM adota três medidas de desempenho para análise de rodovias de pista simples, dependendo da classe do segmento a ser estudada: a porcentagem de tempo

vijando em pelotões (PTSF), a velocidade média de viagem (ATS) e a porcentagem da velocidade de fluxo livre (PFFS).

A PTSF representa a liberdade para realização de manobras e o conforto durante a viagem. É definida como a porcentagem do tempo que os veículos viajam em pelotões atrás de veículos lentos devido à impossibilidade de ultrapassá-los. Dessa definição, é possível perceber que obter PTSF em campo é quase impossível, pois, para isso, deveria existir um pesquisador em cada automóvel presente na rodovia. Sendo assim, o HCM recomenda o uso da porcentagem de veículos em pelotões (PF) como uma medida proxy da PTSF. Segundo o manual, a PF, que é obtida como a porcentagem de headways com valores menores do que 3 segundos, deve ser obtida em um ponto representativo na estrada. No entanto, pelo menos um trabalho (Dixon et al., 2002) mostrou que PF e PTSF podem diferir bastante.

O HCM2010 define três classes de rodovias de pista simples, em função da sua utilização:

- Classe I: são rodovias em que os motoristas esperam viajar com velocidades altas; representa a maior parte das rodovias de pista simples, servem para ligar rodovias com fluxos elevados; podem servir para viagens de longa duração;
- Classe II: motoristas não necessariamente desejam viajar com velocidades elevadas; geralmente são vias em zonas turísticas, bastante frequentadas por veículos recreacionais (por ex., motorhomes e carros com trailers); ou são rodovias em zonas de relevo montanhoso, onde velocidades altas são impossíveis;
- Classe III: são rodovias próximas a áreas urbanas; pode ser parte de uma rodovia de classe I ou de classe II, mas que passam por cidades ou regiões turísticas desenvolvidas; nesses casos, muitas vezes o tráfego local é combinado com tráfego de passagem, gerado por viagens de longa distância.

O método de análise de rodovias de pista simples está apresentado no Capítulo 15 do HCM2010. Nesse capítulo, os níveis de serviço são definidos em:

- Nível A: no caso de rodovias de classe I, os motoristas trafegam com altas velocidades e com liberdade para realização de ultrapassagens; pelotões possuem, no máximo, 3 ou 4 veículos. Para rodovias de classe II, a velocidade desenvolvida depende das condições das rodovias; pequenos pelotões também são esperados; em rodovias de classe III, motoristas trafegam com velocidades próximas da velocidade de fluxo livre (FFS);
- Nível B: capacidade de realizar manobras passam a depender mais do fluxo oposto, e os pelotões passam a ser mais notáveis; em rodovias de classe I, é esperado alguma redução de velocidade, enquanto que em segmentos de classe

III, é difícil manter a velocidade próximo da FFS, embora essa redução seja pequena;

- Nível C: muitos veículos estão viajando em pelotões; em todas as classes, as velocidades são notadamente reduzidas;
- Nível D: pelotões crescem bastante e a demanda por ultrapassagens é bastante alta, embora as oportunidades sejam próximas de zero; em rodovias de classe I e II, a PTSF é bastante elevada; em rodovias de classe III, as velocidades são bem menores do que a FFS;
- Nível E: existe demanda por ultrapassagens por parte de todos os motoristas, com PTSF maior do que 80%. Velocidades são bastante reduzidas em rodovias de classe II, enquanto que, em segmentos de classe III, a velocidade média é menor do que dois terços da FFS; e
- Nível F: o fluxo de tráfego excede a capacidade em uma das duas direções; as condições de operação são instáveis, com regime de fluxo congestionado.

As medidas de desempenho usadas no HCM2010 para determinar o nível de serviço em rodovias de classe I são a ATS e a PTSF. A PTSF é utilizada, sozinha, em rodovias de classe II. Em rodovias de classe III, por conta dos segmentos serem, geralmente, curtos e com restrições de ultrapassagens, os motoristas esperam viajar o mais próximo possível do limite legal de velocidade. Para esse tipo de rodovia, deve-se usar a PFFS, medida de desempenho que não era usada no HCM2000. Os critérios para definição do nível de serviço em rodovias de pista simples estão apresentados na Tabela 1. No caso da classe I, a PTSF e a ATS devem ser atendidas simultaneamente, de acordo com a Figura 1.

Tabela 1: Critérios para determinação do nível de serviço em rodovia de pista simples de classe I, II e III (TRB, 2010)

<i>(a) Rodovias de classe I</i>			<i>(b) Rodovias de classe II</i>		<i>(c) Rodovias de classe III</i>	
NS	PTSF (%)	ATS (km/h)	NS	PTSF (%)	NS	PFFS (%)
A	≤ 35	> 90	A	≤ 40	A	> 91,7
B	> 35-50	> 80-90	B	> 40-55	B	> 83,3-91,7
C	> 50-65	> 70-80	C	> 55-70	C	> 75,0-83,3
D	> 65-80	> 60-70	D	> 70-85	D	> 66,7-70,5
E	> 80	≤ 60	E	> 85	E	≤ 66,7

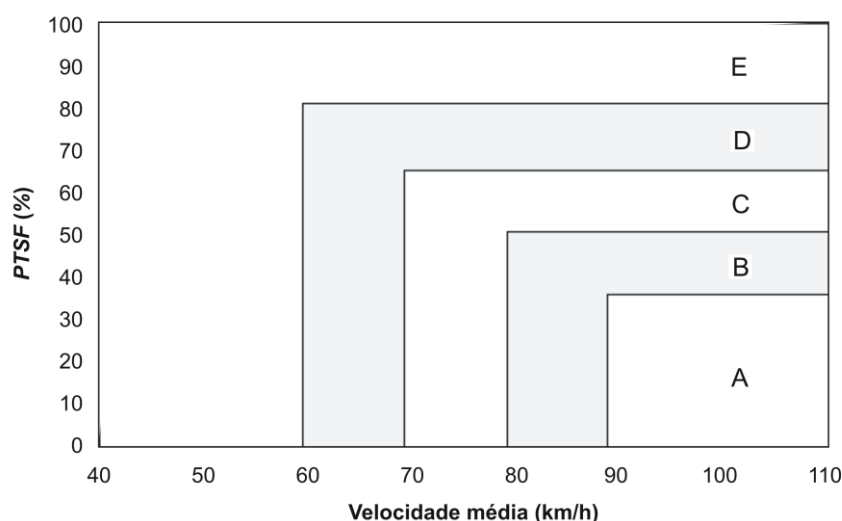


Figura 1: Critério para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples de classe I (TRB, 2000)

Esses critérios devem ser usados na análise direcional, para rampas específicas e com outras características, desde que fatores de ajustes sejam considerados. O nível de serviço “F” é aplicado quando o fluxo de tráfego excede a capacidade, de 1700 cp/h para uma direção do tráfego em condições básicas. Devido à grande interação entre os fluxos nas duas direções, quando a capacidade em uma direção é atingida, a capacidade na direção oposta é reduzida, sendo, dessa forma, a capacidade bidirecional igual a 3200 cp/h.

As condições básicas são padrões desejados que, quando não são atendidos, provocam um efeito negativo nas medidas de desempenho. Para rodovias de pista simples, as condições básicas são: (i) largura das faixas maiores ou iguais a 3,65 m (12 ft); (ii) acostamentos pavimentados com largura maior ou igual a 1,83 m (6 ft); (iii) 100% de zonas com ultrapassagens permitidas; (iv) somente automóveis na corrente de tráfego; (v) relevo plano; e (vi) tráfego ininterrupto.

O HCM2010 fornece relações de tráfego para condições básicas (Equações 1 e 2). No caso da relação entre o fluxo e as medidas de desempenho direcionais, os modelos são obtidos em função do fluxo oposto. Para obter a PTSF, é necessário usar coeficientes para os modelos de acordo com o fluxo oposto, como mostra a Tabela 2.

$$ATS_d = FFS - 0,0125 \cdot (v_d + v_o) - f_{np,ATS} \quad (1)$$

em que ATS_d : velocidade média para a direção analisada (km/h);

FFS : velocidade no fluxo livre (km/h);

$f_{np,ATS}$: fator de ajuste em razão da presença de zonas de ultrapassagens proibidas para estimar ATS_d (Tabela 15-15 do HCM2010);

v_d : fluxo de tráfego na direção analisada, dado em carros de passeio equivalente (cp/h); e

v_o : fluxo de tráfego na direção oposta (cp/h)

$$BPTSF_d = 100 \cdot \left(1 - e^{-a \cdot v_d^b} \right) \quad (2)$$

em que $BPTSF_d$: porcentagem de tempo viajando em pelotões direcional em condições básicas; e

a, b : parâmetros de calibração, em função do fluxo oposto (Tabela 2).

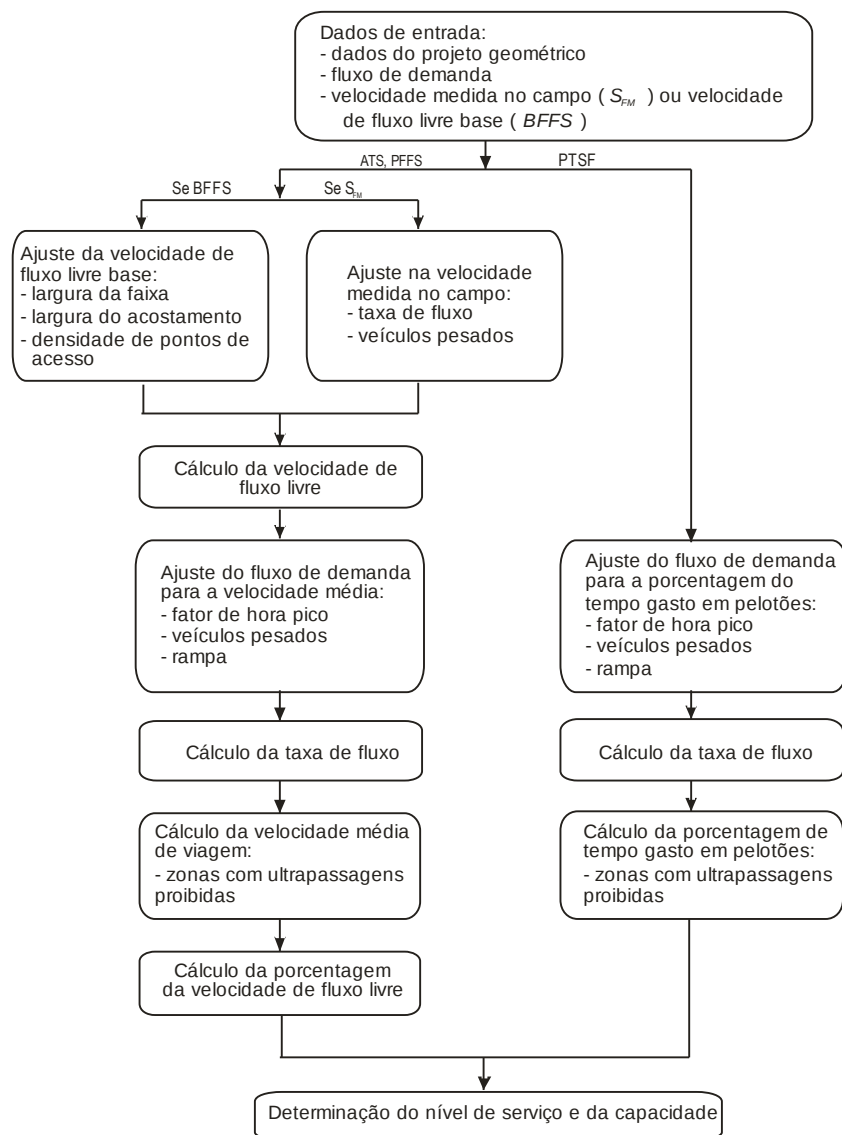


Figura 2: Método para estimativa do nível de serviço para rodovias de pista simples de classe I do HCM2010

Tabela 2: Coeficientes usados na estimativa da PTSF em segmentos unidirecionais

Fluxo na direção oposta (cp/h)	a	b
--------------------------------	-----	-----

≤ 200	-0,0014	0,973
400	-0,0022	0,923
600	-0,0033	0,870
800	-0,0045	0,833
1000	-0,0049	0,829
1200	-0,0054	0,825
1400	-0,0058	0,821
≥ 1600	-0,0062	0,817

Quando são observadas condições não básicas nos segmentos analisados, devem ser aplicados fatores de ajustes nas Equações 1 e 2.

No HCM2010, a análise de segmentos direcionais pode ser realizada para três diferentes tipos de segmentos: com relevo plano ou ondulado, com rampas específicas ascendentes ou com rampas específicas descendentes. O primeiro passo dessa análise consiste em estimar a velocidade de fluxo livre (FFS), que pode ser considerada como a velocidade média de uma corrente de tráfego cujo fluxo de tráfego bidirecional não seja superior a 200 veic/h. Para fluxos maiores, existem duas maneiras de determinar a velocidade de fluxo livre: ou por meio da observação de correntes de tráfego em campo, como mostra a Equação 3, ou realizando uma estimativa por meio da Equação 4.

$$FFS = S_{FM} + 0,0125 \cdot \frac{v}{f_{HV}} \quad (3)$$

em que S_{FM} : velocidade média do tráfego medido em campo (km/h);

v : fluxo de tráfego bidirecional observado (veic/h); e

f_{HV} : fator de ajuste para os veículos pesados.

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A \quad (4)$$

em que $BFFS$: velocidade de fluxo livre básica, entre 70 e 110 km/h;

f_{LS} : fator de ajuste para a largura da faixa e do acostamento (Tabela 15-7 do HCM2010); e

f_A : fator de ajuste para a densidade de pontos de acessos (Tabela 15-8 do HCM2010).

Por definição, $BFFS$ é a velocidade que seria obtida em uma rodovia com alinhamentos vertical e horizontal específicos, se as larguras das faixas de rolagem e os

acostamentos possuem valores padrões e não há pontos de acesso. Algumas vezes, os limites de velocidade impostos não representam às condições das vias e os desejos dos motoristas. O HCM2010 sugere duas maneiras de estimar a velocidade de fluxo livre básica (BFFS): (i) a velocidade de projeto; e (ii) a velocidade limite das rodovias mais 16 km/h (10 mi/h) (TRB, 2010, v.2, p. 15-15).

A determinação do fluxo de tráfego (v_p), na direção analisada e na direção oposta, deve ser medida em carros de passeio equivalente por hora (cp/h) de acordo com a Equação 5. Se os volumes são obtidos a cada 15 minutos, então PHF não é necessário; nesse caso, pega-se o período crítico da hora analisada e multiplica-se por 4. Essa formulação deve ser usada para determinar ATSD e PTSFd separadamente, a partir de coeficientes de ajuste específicos (f_G e f_{HV}) para cada caso.

$$v_p = \frac{V}{PHF \cdot f_G \cdot f_{HV}} \quad (5)$$

em que V : volume horário na direção analisada (veic/h);

PHF : fator de hora pico; e

f_G : fator de ajuste para rampas (Tabelas 15-9 e 15-16 do HCM2010 para estimar ATSD e PTSFd, respectivamente).

A Equação 5 mostra que v_p é função do fator de ajuste para veículos pesados (f_{HV}), calculado de acordo com a Equação 6. Para o caso de segmentos específicos em aclives, que são aqueles com rampas maiores do que 3% e com extensão maior do que 400 m, outros fatores de ajuste devem ser usados (Tabelas 15-10, 15-12, 15-17 e 15-19 do HCM2010).

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1)} \quad (6)$$

em que P_T : proporção de caminhões e ônibus na corrente de tráfego;

P_R : proporção de veículos recreacionais na corrente de tráfego;

E_T : equivalente veicular para os caminhões e ônibus (Tabelas 15-11 e 15-18 do HCM2010 para estimar ATSD e PTSFd, respectivamente); e

E_R : equivalente veicular para os veículos recreacionais.

Para estimar a PTSFd, deve-se usar a formulação:

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \left(\frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right) \quad (7)$$

em que $BPTSF_d$: PTSF direcional em condições básicas (Equação 2);

$f_{np,PTSf}$: fator de ajuste para zonas com ultrapassagens proibidas para estimar PTSFd (Tabela 15-21 do HCM2010);

$v_{d,PTSf}$: fluxo de tráfego direcional para estimação da PTSFd (cp/h); e

$v_{o,PTSf}$: fluxo de tráfego na direção oposta para estimação da PTSFd (cp/h).

A última medida de desempenho a ser obtida, para análise de rodovias de pista simples de classe III, é a PFFS, definida como a razão entre ATSD e FFS. O nível de serviço deve ser determinado de acordo com os critérios da Tabela 1.

A análise de segmentos com faixas adicionais (de ultrapassagens ou de subida) consiste em dividir um segmento a ser analisado (de comprimento L_t) em regiões específicas. Sendo assim, algumas variáveis devem ser definidas:

- L_u , comprimento do segmento antes da faixa de ultrapassagem, em km;
- L_d , comprimento do segmento após os efeitos da faixa de ultrapassagem terem cessado, em km;
- L_{pl} , comprimento da faixa de ultrapassagem (km); e
- L_{de} , comprimento do segmento após o término da faixa de ultrapassagem, onde ainda existe um efeito da faixa de ultrapassagem nas medidas de desempenho (km).

Essas regiões surgem com a presença de faixas adicionais e provocam um impacto nas medidas de desempenho ATS e PTSF, como ilustra as Figuras 3 e 4.

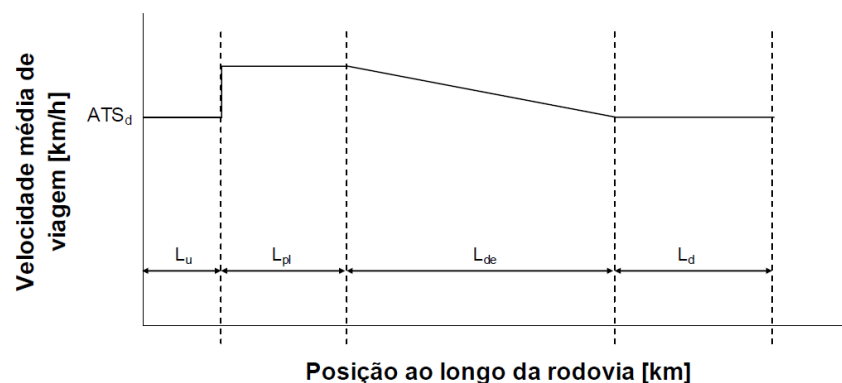


Figura 3: Efeito da faixa adicional na velocidade média de viagem

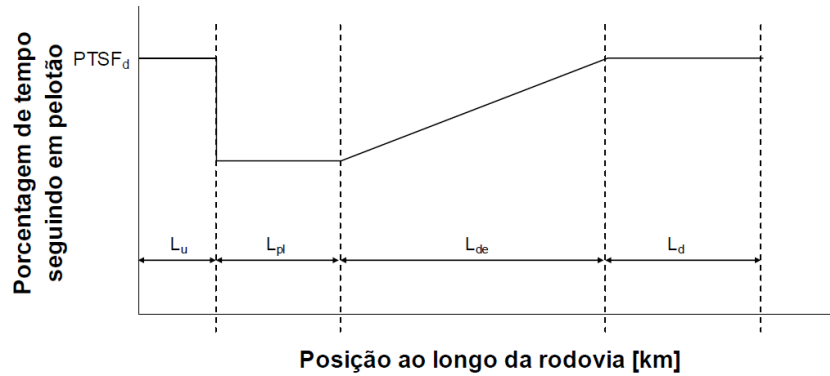


Figura 4: Efeito da faixa adicional na porcentagem de tempo viajando em pelotões

Assim, para faixas de ultrapassagens, as medidas de desempenho devem ser calculadas da seguinte maneira:

$$ATS_{pl} = \frac{ATS_d \cdot L_t}{L_u + L_d + \frac{L_{pl}}{f_{pl}} + \frac{2 \cdot L_{de}}{1 + f_{pl}}} \quad (8)$$

$$PTSF_{pl} = \frac{PTSF_d \cdot \left[L_u + L_d + f_{pl} \cdot L_{pl} + \left(\frac{1 + f_{pl}}{2} \right) \cdot L_{de} \right]}{L_t} \quad (9)$$

em que ATS_{pl} : velocidade média de viagem no segmento com faixa de ultrapassagem (km/h);

$PTSF_{pl}$: porcentagem de tempo viajando em pelotões no segmento com faixa de ultrapassagem; e

f_{pl} : fator de ajuste para as faixas adicionais (Tabelas 15-26 e 15-28 do HCM2010 para faixas de ultrapassagens e Tabela 15-29 do HCM2010 para faixas adicionais em subidas).

Para segmentos com faixas adicionais em subidas, deve ser usado o mesmo procedimento orientado para faixas de ultrapassagens, exceto com relação ao fator de ajuste f_{pl} . Nesse caso, são diferentes em relação aos usados na análise de faixas de ultrapassagens.

Se o segmento observado é interrompido após o final da faixa adicional – devido a uma interseção ou uma cidade, por exemplo – então o segmento L_{de} é interrompido (passando a ser chamado de L'_{de} , menor que L_{de}) e o segmento L_d passa a não existir. Nesses casos, para estimar as medidas de desempenho, as seguintes formulações devem ser usadas:

$$ATS_{pl} = \frac{ATS_d \cdot L_t}{L_u + \frac{L_{pl}}{f_{pl}} + \frac{2 \cdot L'_{de}}{1 + f_{pl} + (f_{pl} - 1) \left(\frac{L_{de} - L'_{de}}{L_{de}} \right)}} \quad (10)$$

$$PTSF_{pl} = \frac{PTSF_d \cdot \left[L_u + f_{pl} \cdot L_{pl} + f_{pl} \cdot L'_{de} + \left(\frac{1 - f_{pl}}{2} \right) \cdot \left(\frac{L'^2_{de}}{L_{de}} \right) \right]}{L_t} \quad (11)$$

4.2. ADAPTAÇÕES DO HCM2000 PARA O BRASIL

No Brasil, algumas pesquisas (Egami, 2006; Mon-Ma, 2008; Bessa Jr., 2009) procuraram adaptar o método do HCM2000 para análise de rodovias de pista simples. Egami (2006) e Mon-Ma (2008), usando dados coletados em rodovias paulistas, respectivamente adaptaram o método para segmentos sem e com faixas adicionais. Foram encontradas relações fundamentais mais adequadas às condições paulistas do que as relações propostas pelo HCM2000. Entretanto, foram mantidas as estruturas dessas relações, as medidas de desempenho usadas pelo manual para determinar o nível de serviço, além dos dados obtidos serem limitados a uma faixa de fluxo bem abaixo da capacidade das vias.

Por essas razões, outro trabalho (Bessa Jr., 2009) determinou relações fundamentais com a inclusão de dados de um trecho de uma rodovia paulista em condições próximas a capacidade, o que influencia diretamente na calibração do simulador utilizado. Além disso, essas relações foram obtidas usando um conjunto de soluções para os parâmetros de calibração, ao invés de utilizar somente um valor para cada um desses parâmetros, referentes à melhor solução encontrada durante o processo de ajuste.

A Figura 5 mostra um exemplo de dois modelos (linear e côncavo) obtidos com a velocidade de fluxo livre de 110 km/h em uma análise bidirecional. Os dados gerados com a utilização de um conjunto de parâmetros de calibração foram chamados de “dados sintéticos”, pois possuíam uma variabilidade semelhante às informações fornecidas por sensores, mas foram produzidos por um simulador de tráfego.

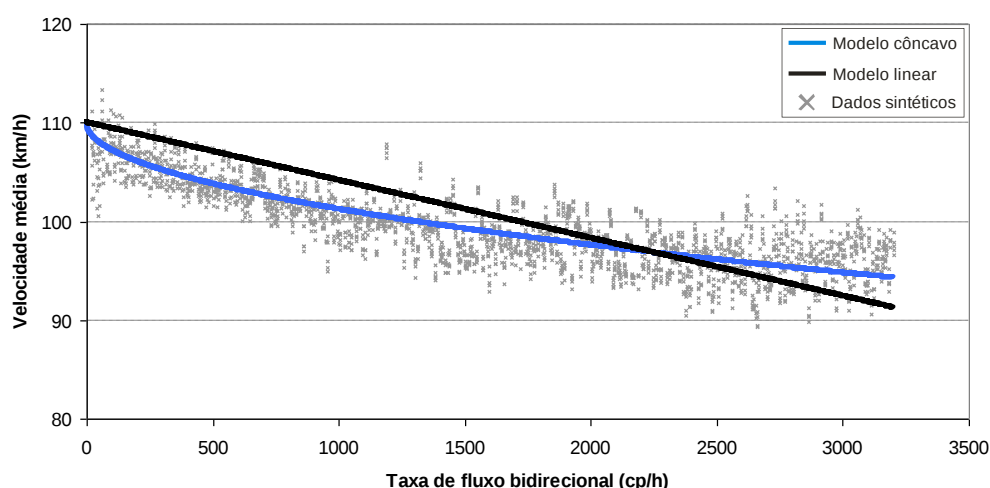


Figura 5: Modelos bidirecionais da relação fluxo-velocidade com FFS = 110 km/h (Bessa Jr., 2009)

A Figura 5 também mostra que o modelo côncavo testado, proposto em trabalhos desenvolvidos na Alemanha (Brilon e Weiser, 1998; Brilon e Weiser, 2006), representa melhor as condições das rodovias paulistas do que o modelo linear, proposto pelo HCM2000.

Bessa Jr. (2009) também concluiu que a PTSF pode ser determinada diretamente em campo a partir da obtenção do número médio de headways dentro e fora dos pelotões, ao contrário da PTSF definida no HCM2000. Essa conclusão, aliada ao fato de que o modelo côncavo representa melhor as condições das rodovias paulistas, reforça a hipótese da necessidade de mais estudos para subsidiar o desenvolvimento de um manual brasileiro para análise da capacidade e do nível de serviço em rodovias.

4.3 BESSA JR. (2015)

Ao contrário dos estudos apresentados no item anterior, o trabalho de Bessa Jr. (2015) teve como premissa não utilizar a estrutura proposta pelo HCM2010. A ideia era dar subsídios para criação de um método de cálculo de nível de serviço que fosse mais adequado às condições brasileiras, em que o foco principal era a proposição de medidas de desempenho que pudessem ser obtidas diretamente da observação do tráfego, como alternativa à PTSF.

O método proposto para análise de medidas de desempenho para rodovias de pista simples (MOEs) é apresentado na Figura 6. O processo inicia-se com a coleta de dados de tráfego: os dados dos sensores são usados para encontrar alguns dados de entrada na modelagem dos segmentos de rodovias, enquanto que os segmentos no entorno dos sensores são utilizados para gerar dados de tráfego sintéticos; aqueles dados obtidos com filmadoras são usados para calibrar e validar o simulador escolhido (CORSIM) e avaliar a qualidade das MOEs fornecidas pelos modelos de tráfego desenvolvidos.

Uma vez que o simulador recalibrado é considerado capaz de reproduzir o comportamento das correntes de tráfego observadas nas rodovias escolhidas, gera-se o conjunto de dados de tráfego sintéticos que será usado para a criação dos modelos de tráfego. Os dados sintéticos são necessários porque é absolutamente inviável observar diretamente no campo correntes de tráfego com toda a gama de fluxos e porcentagens de caminhões necessária para a criação dos modelos, para as características de projeto geométrico e velocidade de fluxo livre desejadas (Bessa Jr. e Setti, 2011).

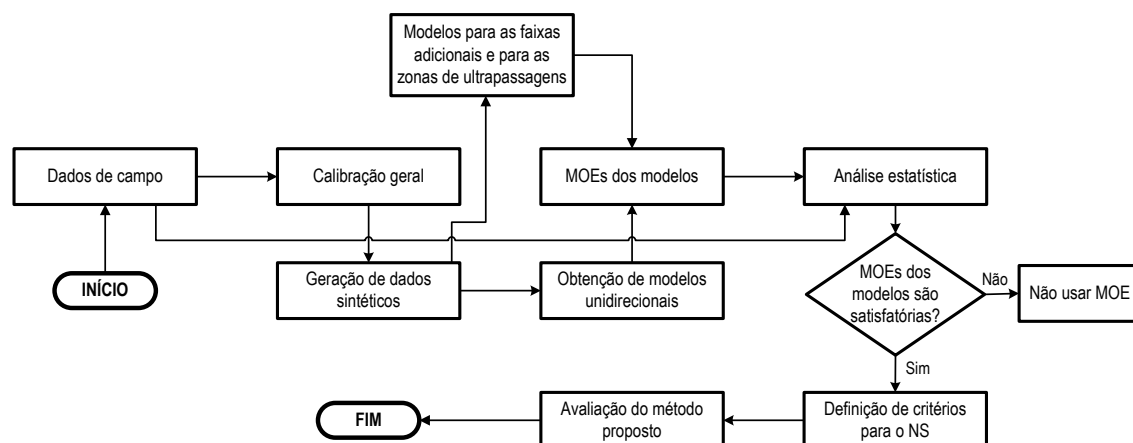


Figura 6: Método proposto para avaliação de MOEs capazes de indicar a qualidade de serviço em rodovias de pista simples (Bessa Jr., 2015)

Com os modelos que expressam as relações entre o fluxo de tráfego e as MOEs, são estimados os valores das MOEs para um conjunto de trechos selecionados, para os quais estão disponíveis filmagens da corrente de tráfego. A adequação da MOE é verificada por meio de funções de qualidade de ajustamento, que comparam os valores estimados pelo modelo com os valores observados em campo para cada MOE. Essa comparação determina quais MOEs poderiam ser ou não usadas para criar um critério de nível de serviço.

Algumas MOEs podem ser obtidas a partir de um único modelo de tráfego, como é o caso das MOEs que podem ser determinadas com a relação fluxo-velocidade e daquelas MOEs calculadas a partir do número médio de veículos dentro e fora dos pelotões. No caso da relação fluxo-velocidade, foi escolhido o modelo do tipo côncavo, que é usado pelo HBS2001 e apresentou resultados melhores para dados brasileiros em ocasiões anteriores (Bessa Jr. e Setti, 2011; Bessa Jr., 2015). Com base na revisão da literatura (Polus e Cohen, 2009; TRB, 2010; ODOT, 2014) e da observação do formato das nuvens de pontos, foram propostos: um modelo quadrático para estimar FD, uma curva exponencial para encontrar PF e PI, uma relação linear para Q0 e um modelo hiperbólico para determinar N0. Os modelos de tráfego unidirecionais analisados, com a inclusão do índice d para indicar quando forem obtidas em uma direção, seguem as seguintes formulações:

$$ATS_{d,car} = a + b \cdot \sqrt{q_d} \quad (12)$$

$$FD_d = a \cdot q_d^2 \quad (13)$$

$$PF_d = 100 - \exp(a \cdot q_d^b) \quad (14)$$

$$PI_d = 100 - \exp(a \cdot q_d^b) \quad (15)$$

$$Q_{0d} = a \cdot q_d \quad (16)$$

$$N_{0d} = a \cdot q_d^b \quad (17)$$

em que $ATS_{d,car}$ é a velocidade média de percurso direcional dos automóveis (km/h); q_d é o fluxo de tráfego no sentido analisado (veh/h); e a e b são parâmetros obtidos por regressão.

Os modelos foram ajustados a partir de dados sintéticos, produzidos a partir de simulações que recriam as condições desejadas de fluxo de tráfego, porcentagem de caminhões, geometria do trecho e velocidade de fluxo livre na direção desejada. Para uma dada velocidade de fluxo livre direcional (FFS_d), foram desenvolvidas 24 funções relacionando o fluxo e uma MOE, resultantes da combinação de quatro valores entre os parâmetros RF e KU (que representam os alinhamentos vertical e horizontal, respectivamente) e seis valores para a porcentagem de veículos pesados P_{hv} (de 0 a 50%, em intervalos de 10%). Foram obtidos modelos para quatro valores de FFS_d (70, 80, 90 e 100 km/h), resultando em $4 \times 6 \times 4 = 96$ modelos de tráfego. Para que houvesse 500 correntes de tráfego na regressão de cada modelo, foram simuladas $500 \times 96 = 48.000$ cenários, replicados cinco vezes cada. Os modelos foram gerados sem faixas adicionais.

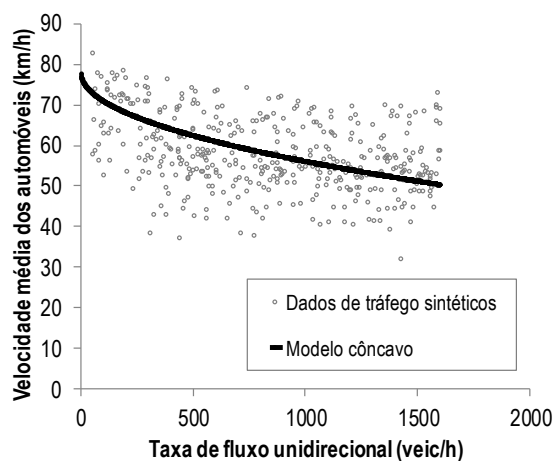
A Tabela 3 mostra exemplos de parâmetros a e b obtidos com FFS_d igual a 70 km/h. Os demais parâmetros podem ser visualizados no arquivo complementar.

Tabela 3: Parâmetros da relação fluxo-velocidade com $FFS_d = 70$ km/h (Bessa Jr., 2015)

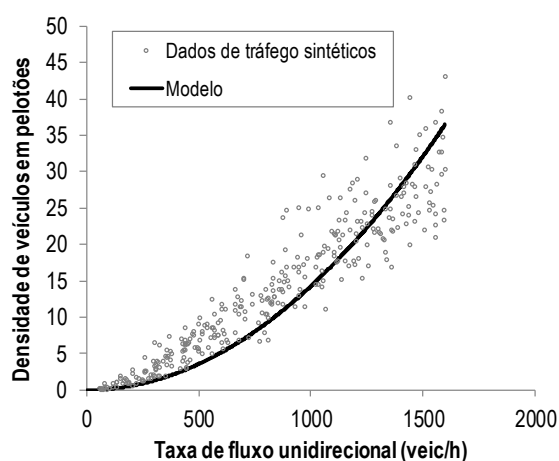
$P_{hv} = 0\%$							$P_{hv} = 30\%$						
KU (graus/km)	RF (m/km)						KU (graus/km)	RF (m/km)					
	≤ 20			20 - 40				≤ 20			20 - 40		
	a	b	R^2	a	b	R^2		a	b	R^2	a	b	R^2
≤ 50	64,61	-0,520	0,80	67,26	-0,587	0,84	≤ 50	68,11	-0,668	0,86	62,14	-0,613	0,83
100 – 150	–	–	–	58,67	-0,488	0,83	100 – 150	–	–	–	54,53	-0,707	0,80
150 – 200	57,91	-0,391	0,71	–	–	–	150 – 200	59,60	-0,649	0,87	–	–	–
$P_{hv} = 10\%$							$P_{hv} = 40\%$						

RF (m/km)							RF (m/km)						
KU (graus/km)	≤ 20			20 - 40			KU (graus/km)	≤ 20			20 - 40		
	a	b	R ²	a	b	R ²		a	b	R ²	a	b	R ²
≤ 50	66,60	-0,580	0,83	68,16	-0,746	0,86	≤ 50	67,30	-0,608	0,84	61,97	-0,629	0,81
100 – 150	–	–	–	57,11	-0,637	0,79	100 – 150	–	–	–	54,58	-0,763	0,88
150 – 200	57,96	-0,481	0,82	–	–	–	150 – 200	61,57	-0,683	0,90	–	–	–
P_{hv} = 20%							P_{hv} = 50%						
RF (m/km)							RF (m/km)						
KU (graus/km)	≤ 20			20 - 40			KU (graus/km)	≤ 20			20 - 40		
	a	b	R ²	a	b	R ²		a	b	R ²	a	b	R ²
≤ 50	64,04	-0,512	0,80	69,36	-0,825	0,87	≤ 50	63,60	-0,508	0,79	62,30	-0,703	0,82
100 – 150	–	–	–	57,91	-0,792	0,85	100 – 150	–	–	–	57,54	-0,870	0,92
150 – 200	57,18	-0,484	0,78	–	–	–	150 – 200	58,86	-0,661	0,88	–	–	–

A Figura 7 ilustra os modelos obtidos a partir dos dados sintéticos de tráfego gerados com o CORSIM. Percebe-se que, com exceção da densidade de veículos em pelotões, há uma dispersão muito grande nos dados.



(a)



(b)

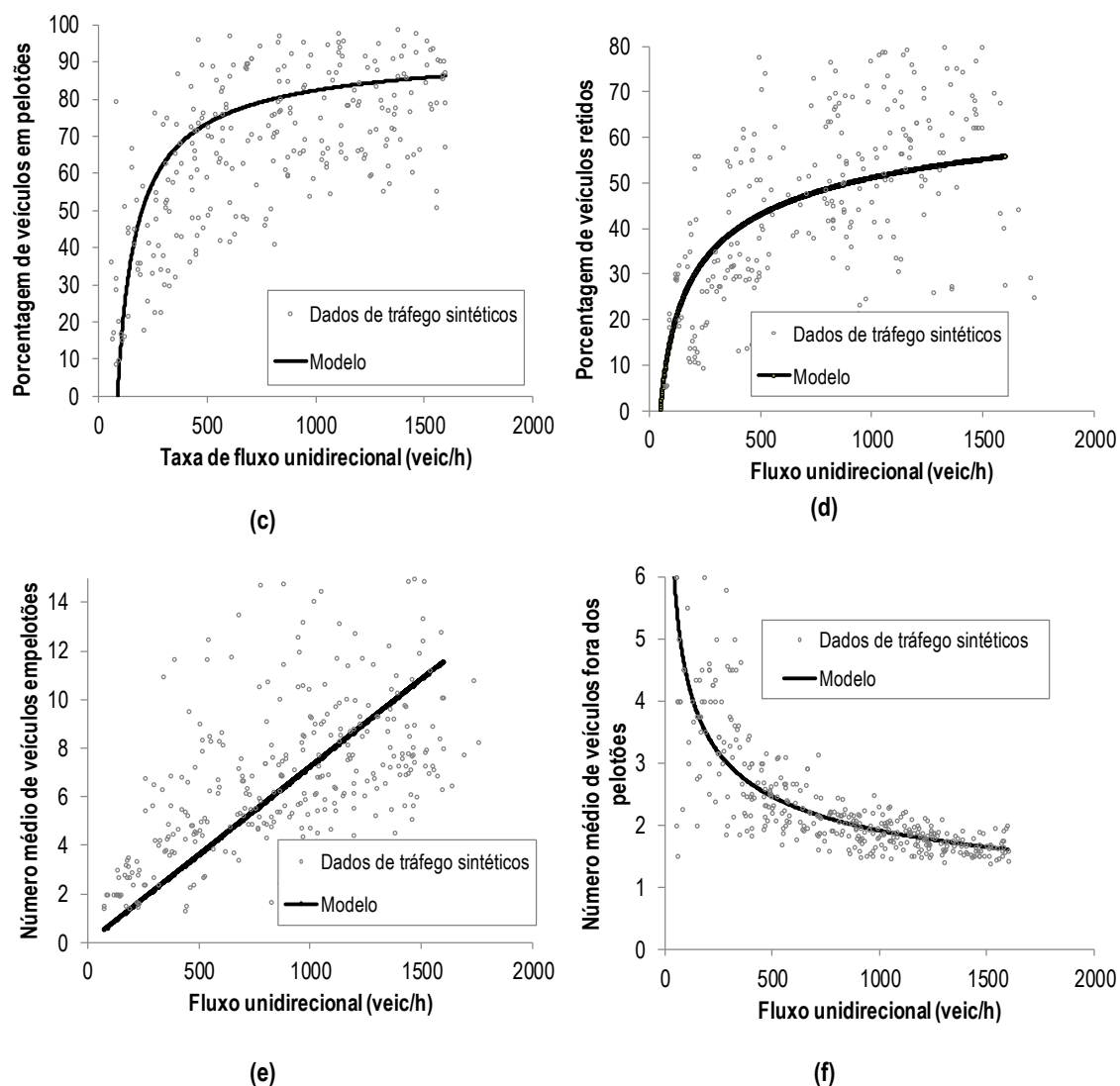


Figura 7: Modelos obtidos a partir de dados sintéticos para $RF \leq 20$ m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$ e $Ph_v = 0\%$ para encontrar as MOEs: (a) velocidade média dos automóveis; (b) densidade de veículos em pelotões; (c) porcentagem de veículos em pelotões; (d) porcentagem de veículos retidos; (e) número médio de veículos em pelotões; e (f) número médio de veículos fora dos pelotões (Bessa Jr., 2015)

O conjunto de trechos selecionados para este estudo é formado por seções com e sem faixas adicionais. O impacto das faixas adicionais nas MOEs foi determinado através de fatores de ajuste. Para tanto, foram modelados no CORSIM os segmentos usados para gerar os dados sintéticos com e sem as faixas adicionais e foi determinada a diferença na MOE obtido com a implantação da faixa.

Entre os parâmetros estudados (fluxos direcionais, Ph_v , RF , KU e declividade), o comprimento da faixa adicional L foi a variável independente que apresentou a maior correlação com os valores dos fatores de ajuste. A inclusão de outras variáveis independentes, apesar de ter correlação com as diferenças de velocidade, não aumentou muito o coeficiente de determinação R^2 do modelo, com nível de significância de 0,05.

Assim, somente o comprimento L da faixa adicional foi suficiente para estimar as diferenças de velocidades, com boa significância geral ($p < 0,05$).

As MOEs na direção estudada num trecho com faixa adicional de comprimento L deve ser obtida somando-se ou subtraindo-se um fator de ajuste à determinada MOE, de tal forma que:

$$ATSpl_{d,car} = ATS_{d,car} + 0,00589 \cdot L \quad (R^2 = 0,78) \quad (18)$$

$$FDpl_d = FD_d - 0,000580 \cdot L \quad (R^2 = 0,94) \quad (19)$$

$$PFpl_d = PF_d - 0,0145 \cdot L \quad (R^2 = 0,83) \quad (20)$$

$$PIpl_d = PI_d - 0,00434 \cdot L \quad (R^2 = 0,59) \quad (21)$$

$$Q_0pl_d = Q_{0d} - 0,000178 \cdot L \quad (R^2 = 0,59) \quad (22)$$

$$N_0pl_d = N_{0d} + 0,000723 \cdot L \quad (R^2 = 0,20) \quad (23)$$

em que: $ATSpl_d$, ATS_d : velocidade média dos automóveis com e sem as faixas adicionais, respectivamente (veh/km);

$FDpl_d$, FD_d : densidade de veículos em pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente (veh/km);

$PFpl_d$, PF_d : porcentagem de veículos em pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente;

$PIpl_d$, PI_d : porcentagem de veículos retidos com e sem as faixas adicionais, respectivamente;

Q_0pl_d , Q_{0d} : número médio de veículos em pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente (veh);

N_0pl_d , N_{0d} : número médio de veículos fora dos pelotões com e sem as faixas adicionais, respectivamente (veh);

Uma vez obtidas as relações fluxo-MOE e os modelos para determinar o impacto da inclusão de faixas adicionais, foi avaliado se os modelos calibrados forneciam valores adequados para as MOEs que podem ser obtidas a partir desses modelos. A Figura 8 mostra os resultados dessa análise para as MOEs obtidas a partir da relação fluxo-velocidade. Por sua vez, a Figura 9 ilustra o mesmo estudo para FD, PF e PI, enquanto que a Figura 10 apresenta a análise para as MOEs calculadas a partir de Q0 e N0.

Percebe-se que a dispersão das MOEs, tanto para os valores observados como para os gerados pelos modelos, é bem distinta. Para a densidade dos automóveis e para a densidade de veículos em pelotões, a dispersão é pequena; para a velocidade média de percurso é maior; e, para as demais MOEs, é muito grande.

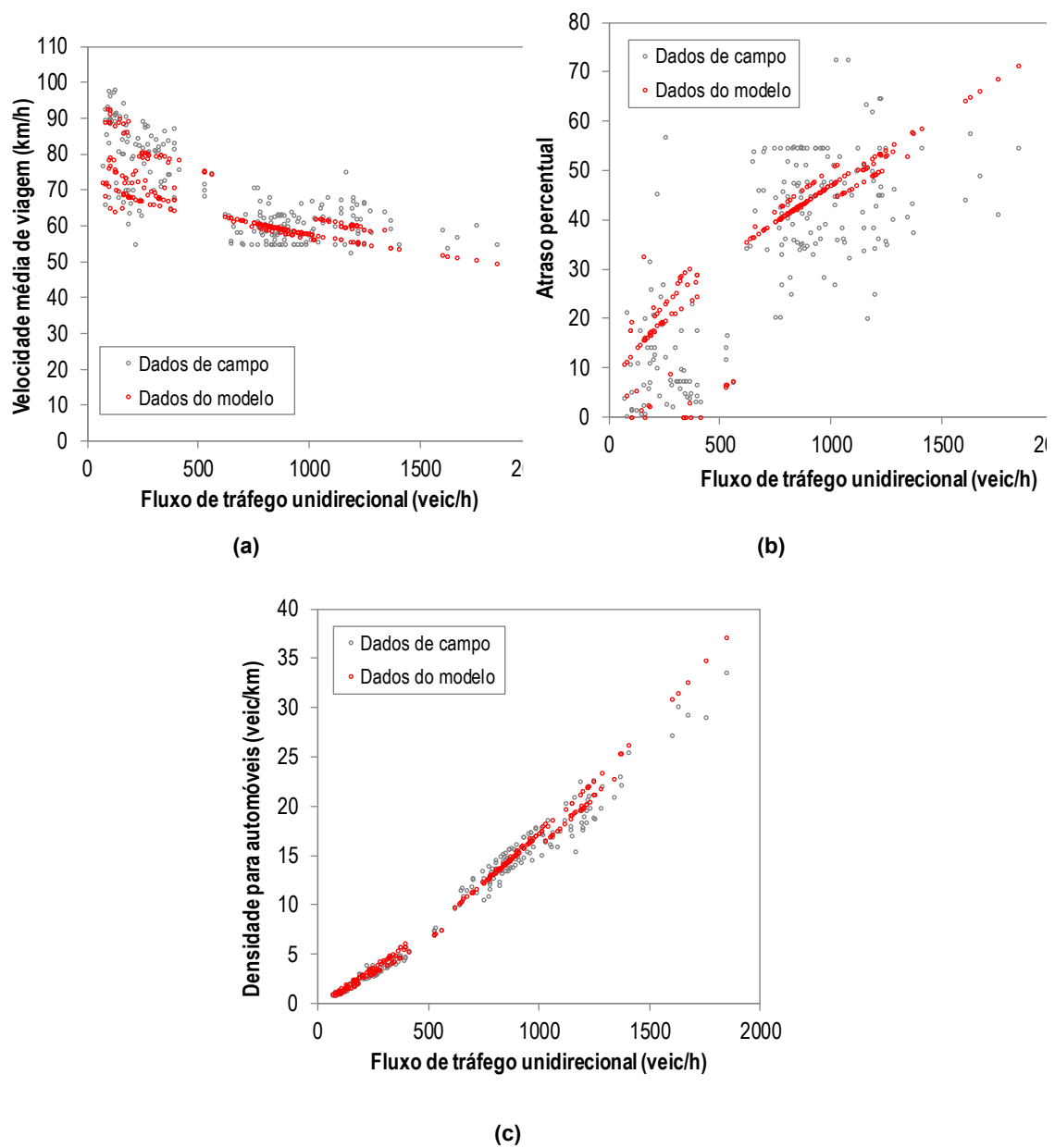


Figura 8: MOEs obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) velocidade média de percurso; (b) atraso percentual; e (c) densidade para automóveis (Bessa Jr., 2015)

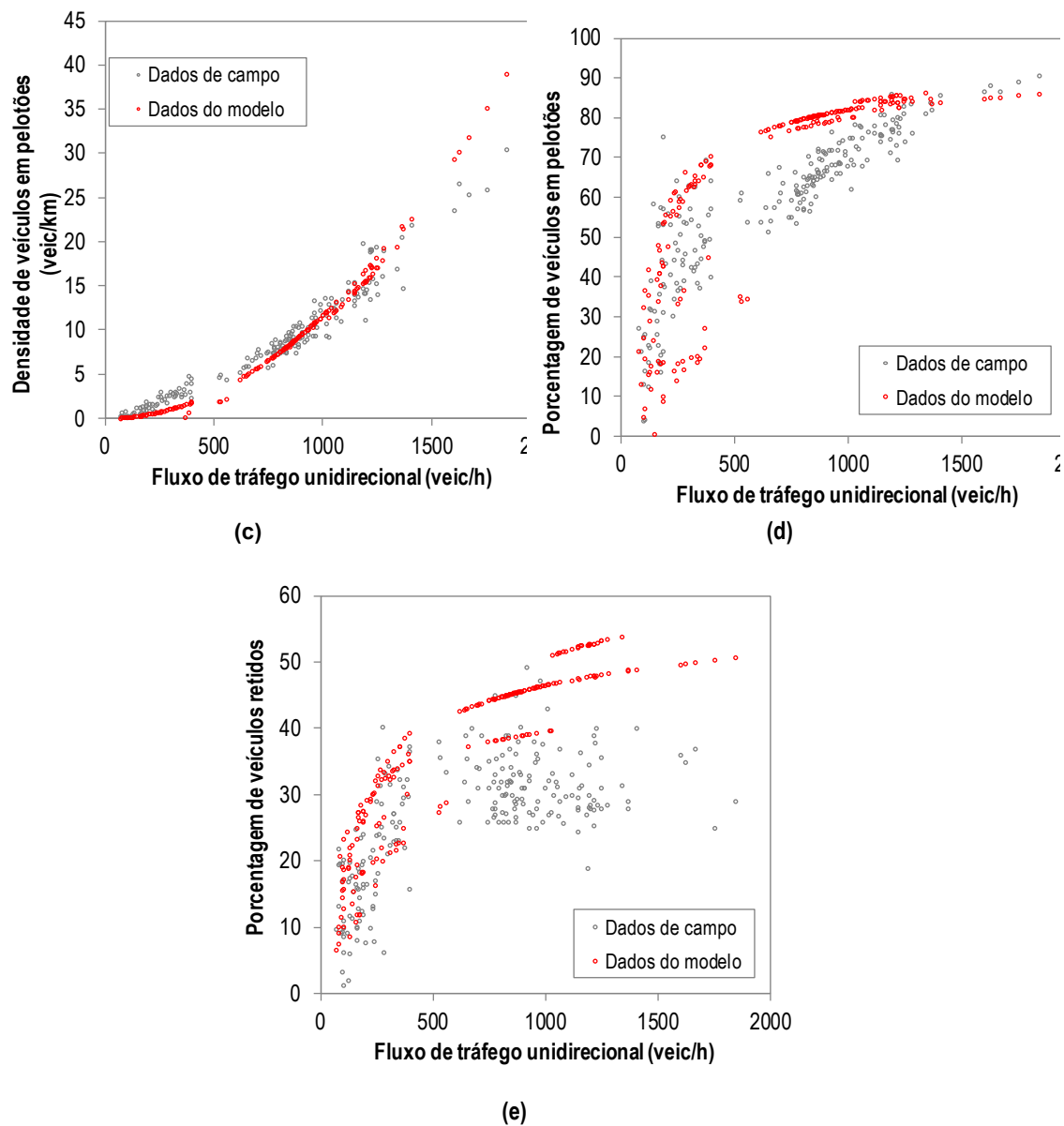


Figura 9: MOEs obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) densidade de veículos em pelotões; (b) porcentagem de veículos em pelotões; (c) porcentagem de veículos retidos (Bessa Jr., 2015)

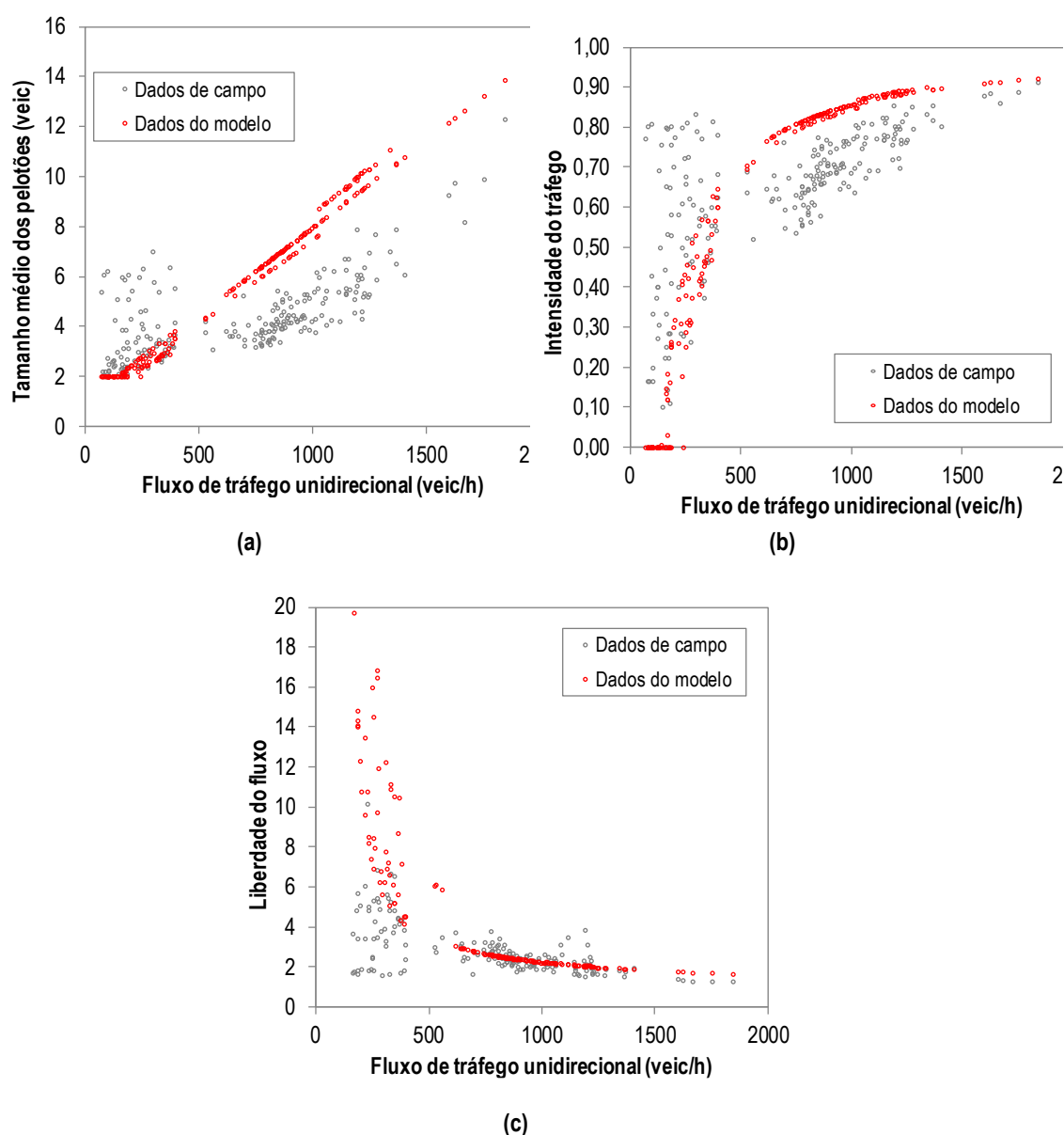


Figura 10: MOEs obtidas em campo e obtidas dos modelos de tráfego para parte dos dados coletados com filmadoras: (a) tamanho médio dos pelotões; (b) intensidade do tráfego; e (c) liberdade do fluxo (Bessa Jr., 2015)

Em vista dos resultados obtidos, Bessa Jr (2015) concluiu que três medidas de desempenho poderiam ser usadas: a velocidade média de viagem dos automóveis, a densidade para automóveis e a densidade de veículos em pelotões. A primeira, conceitualmente, faz parte do cálculo das duas últimas. Sendo assim, recomenda-se utilizar um critério baseado ou na densidade para automóveis ou na densidade de veículos em pelotões para determinar o nível de serviço em rodovias brasileiras.

O HCM classifica os níveis de serviço em regime de fluxo não congestionado em cinco classes, de A a E. Faz-se necessário encontrar critérios adequados para definir os níveis de serviço. Consideram-se os modelos em condições básicas aqueles com $RF \leq 20$

m/km, $KU \leq 50^\circ/\text{km}$ e $Phv = 0\%$. Foram propostos os intervalos que definem a mudança de nível de serviço. Os critérios de $D_{d,car}$ e FD_d foram baseados no critério do HCM para $PTSF$. A Tabela 4 mostra os intervalos propostos a partir dos resultados obtidos da análise.

Tabela 4: Critérios para determinação do nível de serviço com base nas medidas de desempenho propostas

NS	$D_{d,car}$ (veic/km)	FD_d (veic/km)
A	≤ 4	≤ 2
B	$> 4 - 7$	$> 2 - 4$
C	$> 7 - 10$	$> 4 - 6$
D	$> 10 - 15$	$> 6 - 14$
E	> 15	> 14

Para as correntes de tráfego coletadas em campo com as filmadoras, os níveis de serviço foram calculados segundo o critério do HCM2010 para rodovias de classe I, baseados em ATS_d (obtido em campo) e $PTSF_d$ (representado pela medida proxy PF_d , como sugere o manual). Para comparar com esses valores, foram obtidos os níveis de serviço em função da densidade para automóveis e da densidade de veículos em pelotões.

A Tabela 5 mostra a proporção dos níveis de serviço encontrados para as correntes de tráfego de acordo com o critério encontrado para as medidas de desempenho. A tabela mostra que o critério do HCM2010 foi o que forneceu os piores valores do nível de serviço, com mais de 50% das correntes de tráfego com nível de serviço E. Quando o critério foi baseado na densidade $D_{d,car}$, houve uma distribuição quase igualitária entre os níveis de serviço A, D e E. Quando o critério foi FD_d , a quantidade de níveis de serviço concentrou-se em D, com 50% das correntes de tráfego.

Tabela 5: Porcentagens de cada nível de serviço obtidas de acordo com o critério

NS	HCM2010	$D_{d,car}$	FD_d
A	3,8%	30,8%	19,4%
B	8,1%	11,8%	19,0%
C	11,8%	0,9%	3,8%
D	18,0%	24,2%	50,2%
E	58,3%	32,2%	7,6%

Esses resultados demonstram que os critérios do HCM2010 podem precisar de uma revisão, pois, aparentemente, há uma tendência de subestimar os níveis de serviço de segmentos de rodovias de pista simples brasileiras. Outra alternativa poderia ser o desenvolvimento de um método brasileiro para calcular o nível de serviço, que é o que esta proposta busca, ao menos, subsidiar.

5. MÉTODO

O método proposto para este projeto de pesquisa é baseado nas principais recomendações de Bessa Jr. (2015). A primeira delas diz respeito à coleta de dados. Foi obtido um conjunto de dados de tráfego com várias características, compreendendo correntes de tráfego com uma gama ampla de fluxos de tráfego, variando entre volumes baixos até próximos à capacidade, coletados em locais com geometria viária diversa e representativa principalmente das rodovias do estado de São Paulo. A obtenção de dados em outros locais, como na BR-040, poderia fazer com que a calibração do simulador de tráfego e os modelos obtidos pudessem ganhar em confiabilidade. Seria importante, ainda, a coleta de dados em segmentos com perfis geométricos não observados por Bessa Jr. (2015), sobretudo para obtenção de novos modelos de tráfego.

Das nove medidas de desempenho avaliadas, usando-se modelos de tráfego como parte central do método, duas foram consideradas adequadas para substituir a *PTSF*, que é praticamente impossível de ser obtida diretamente em campo: a densidade dos automóveis e a densidade de veículos em pelotões. A coleta de novos dados poderia incluir segmentos de estradas com uma maior diversidade geométrica, tanto para gerar dados sintéticos quanto para validar os novos modelos de tráfego.

Seria importante, também, uma análise mais profunda acerca do impacto nas medidas de desempenho devido à presença de zonas de ultrapassagens proibidas. O mesmo deverá ser feito para avaliar o efeito da implantação de faixas adicionais.

Outro aspecto importante são os critérios para determinar o nível de serviço com base nas medidas de desempenho propostas. Seria importante revisar os critérios do HCM2010, principalmente porque o próprio manual admite que eles não foram desenvolvidos com base na opinião do usuário.

Com base nas recomendações supracitadas, são propostas as seguintes etapas da pesquisa:

1. Coleta, tratamento e análise preliminar de dados de tráfego: escolher locais na BR-040 com a maior diversidade possível em termos geométricos e de fluxo de tráfego;
2. Escolha e calibração do simulador: além do CORSIM, o Vissim, o Aimsun e o TransModeler possuem a capacidade de simular rodovias de pista simples; deve-se escolher o simulador que melhor representam as particularidades locais da BR-040;

3. Determinar parâmetros de projeto com base em dados sobre o volume de tráfego (fator K, gatilho a partir do VMD, veículos de projeto, etc.)
4. Obtenção das relações entre o fluxo de tráfego e as medidas de desempenho propostas por Bessa Jr. (2015) para condições geométricas ainda não analisadas;
5. Estudo do efeito de faixas adicionais e de zonas com ultrapassagens proibidas; e
6. Proposta de critérios para determinação do nível de serviço, principalmente com base na opinião dos usuários.

6. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

O cronograma de atividades refere-se a um período de 18 meses, a contar do início do projeto de pesquisa. As atividades a serem desenvolvidas no projeto são:

1. Revisão da literatura (simuladores de tráfego; técnicas de calibração baseados em algoritmos genéticos; manuais de capacidade viária; medidas de desempenho para cálculo do nível de serviço; relações fundamentais de tráfego; efeitos das faixas adicionais e zonas de ultrapassagens proibidas; e obtenção de critérios para determinação do nível de serviço com base na opinião do usuário);
2. Coleta e tratamento dos dados de tráfego;
3. Avaliação, escolha e aprendizado do modelo de simulação;
4. Calibração e validação do modelo de simulação adotado;
5. Realização dos experimentos de simulação para determinação das relações fundamentais do tráfego em condições geométricas ainda não determinadas;
6. Realização dos experimentos de simulação para determinação das relações ou dos fatores de ajuste relacionados com as faixas adicionais e as zonas de ultrapassagens proibidas;
7. Determinação de parâmetros de projeto, como o fator K, o gatilho a partir do VMD e o veículo de projeto;
8. Determinação de critérios para determinação no nível de serviço a partir das medidas de desempenho propostas e com base na opinião do usuário;

As seguintes atividades são detalhadas a seguir.

6.1. REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão da literatura, deve-se buscar conhecer o estado da técnica sobre os principais manuais de capacidade viária utilizados no mundo. Obviamente, devem ser estudadas as nuances do Highway Capacity Manual, maior referência na análise da capacidade e do nível de serviço de rodovias, cuja última edição foi lançada em dezembro de 2010, mas que há uma previsão de lançamento da nova versão no final de 2017. Outro manual bastante difundido na literatura é o HBS2001, que possui métodos desenvolvidos especificamente para avaliação de rodovias alemãs. O objetivo desta parte da revisão bibliográfica é identificar quais as principais características da metodologia para avaliar rodovias de pista simples, especialmente as medidas de desempenho.

É importante, ainda, realizar uma revisão bibliográfica sobre:

- De métodos para coleta de dados de tráfego, como as que são baseadas em filmadoras, oriundos de laços indutivos, de equipamentos de coletas de dados pontuais e por outros meios não convencionais (como a partir de Drones);
- Simuladores de tráfego em rodovias de pista simples;
- Sobre métodos para calibração de simuladores de tráfego, principalmente aqueles baseados em computação evolutiva, como os Algoritmos Genéticos;
- Sobre formas de relacionar medidas de desempenho por meios de outras variáveis do tráfego, como o fluxo;
- Métodos para determinar o impacto no tráfego quando há faixas adicionais e quando há zonas de ultrapassagens proibidas;
- Determinação de parâmetros de projeto voltados para nível de serviço, como a hora de projeto, o fator K, o volume médio diário, veículos padrões, etc.;
- Sobre critérios de determinação do nível de serviço com base em medidas de desempenho apropriadas, principalmente a partir da opinião do usuário.

6.2. COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

Os dados de tráfego deverão ser usados para calibrar e validar o modelo de simulação, para estudar as relações entre a qualidade de serviço e o fluxo de tráfego e para determinar as medidas de desempenho que serão usadas para estimar o nível de serviço. Essas informações devem ser provenientes de: i) coletas de campo por meio do uso de câmeras filmadoras; e ii) sensores permanentes de tráfego, como os laços indutivos, que complementam as informações obtidas pelas câmeras; iii) sensores não intrusivos (no pavimento), tais como sensores de micro-ondas; iv) outros meios, como a partir de Drones.

Os dados de tráfego devem ser obtidos de forma a se dispor de uma amostra representativa das rodovias de pista simples, tanto do ponto de vista das características geométricas e do relevo, como das características do tráfego. Os dados de tráfego devem, tanto quanto possível, cobrir uma ampla gama de condições operacionais, desde fluxos próximos da capacidade a níveis de fluxo intermediários e baixos.

6.3. AVALIAÇÃO E ESCOLHA DO SIMULADOR

Consiste em identificar e descrever as características dos principais simuladores de rodovias de pista simples presentes no mercado. O objetivo é subsidiar a escolha do software mais adequado para os objetivos específicos propostos nesta pesquisa, tais como: i) CORSIM; ii) AIMSUN; iii) TransModeler; e iv) VISSIM. Destes, o VISSIM surge como o possível simulador a ser adquirido, por ser um dos softwares mais utilizados no mundo e ser constantemente atualizado. Nessa fase, é preciso realizar um treinamento da equipe envolvida, principalmente com ênfase na modelagem de rodovias de pista

simples, mas não somente (é importante a modelagem de outros tipos de rodovias e dispositivos, como rotatórias e interseções).

6.4. PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS TÉCNICOS-CIENTÍFICOS

Pretende-se participar de uma série de eventos técnicos-científicos no período vigente do projeto, como o Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET) e o Workshop de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões Rodoviárias.

6.5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SIMULADOR

Deve ser realizada a calibração e a validação do simulador a partir heurísticas de busca e otimização, como as que compõem a computação evolutiva, especialmente os algoritmos genéticos (AG's), amplamente utilizados com êxito em outros trabalhos [Bessa Jr. e Setti, 2015; Bessa Jr. et al., 2017]. Foram escolhidos 44 parâmetros de calibração do CORSIM, tendo sido realizada uma estimativa da velocidade de fluxo livre direcional. Embora os resultados obtidos tenham apresentados valores melhores para a função objetivo do que usando somente parâmetros default, essa etapa de calibração necessita ser continuada, com vistas a obter parâmetros de calibração mais confiáveis.

Os seguintes testes deverão, ainda, ser feitos sobre a calibração da simulação:

- Deve-se fazer uma análise mais minuciosa sobre quais modelos e suas variáveis devem ser calibradas. Deve-se avaliar, inclusive, se não seria melhor diminuir o número de parâmetros, pois, caso contrário, o processo de otimização pode estar sendo caótico.
- A função fitness reflete as diferenças entre os valores médios das medidas de desempenho observadas em campo e fornecidas pelo simulador. Pode-se obter resultados melhores se forem comparadas as distribuições de frequência dessas variáveis.
- Devem-se executar outras estratégias para o algoritmo genético desenvolvido e que não foram testadas neste relatório.

6.6. RELAÇÕES FUNDAMENTAIS DO TRÁFEGO

Deverão ser obtidas curvas que relacionem o fluxo de tráfego com as medidas de desempenho selecionadas para estimar o nível de serviço, em condições básicas. A relação fluxo-velocidade é uma dessas relações e a capacidade para as estradas brasileiras deve ser determinada. Para isso, serão utilizados somente dados de tráfego sintéticos produzidos por meio de simulação de tráfego [Bessa Jr. e Setti, 2015], para que seja possível controlar todas as variáveis envolvidas. Nesse caso, deve-se avaliar, inclusive por meio da literatura, quais tipos de modelos podem ser testados.

6.7. ANÁLISE DE FAIXAS ADICIONAIS E ZONAS DE ULTRAPASSAGENS PROIBIDAS

A análise de faixas adicionais e de zonas de ultrapassagens proibidas consiste numa das etapas mais importantes do projeto, pois observa-se, na literatura, métodos que buscam estimar o impacto no tráfego desses dispositivos que são imprecisos. O próprio método do HCM2010, embora complexo, tem apresentado pouca aplicação prática e deve fortemente revisado quando da publicação do novo HCM, ainda em 2017.

6.8. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO

A partir dos dados de tráfego obtidos, deve-se obter parâmetros de projeto, como o fator K, o gatilho a partir do VMD e o veículo de projeto. É importante ressaltar que muitos desses parâmetros, como aqueles sugeridos no Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT 2016), são baseados em algumas rodovias brasileiras, que podem ter condições de tráfego bem distintas daquelas encontradas na BR-040 (sob concessão da Via 040).

6.9. CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DO NS

Devem ser estabelecidos critérios para o cálculo do nível de serviço a partir das relações entre o fluxo de tráfego e as medidas de desempenho (condições básicas e não básicas). Com esses modelos, estima-se o nível de serviço em correntes de tráfego obtidas diretamente do campo e com os modelos de tráfego propostos. Em seguida, uma análise estatística deve ser realizada para concluir sobre a acurácia desses modelos.

6.10. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS ATÉ O MOMENTO E CRONOGRAMA

O projeto de pesquisa compreende um período de 18 meses, executado em duas fases. Na primeira delas, de novembro de 2017 a abril de 2018, foram planejadas as etapas 1, 2 e 3. Com relação às etapas iniciadas na primeira fase, vale ressaltar os seguintes aspectos:

- Revisão da literatura: os manuais HCM (todas as versões) e o HBS2001 foram intensamente estudados, com destaque para a última versão do HCM, que possui o novo método de determinação do nível de serviço voltado para rodovias de pista simples. Além disso, foram analisados trabalhos sobre adaptações ou métodos alternativos àqueles encontrados em manuais de capacidade viária, tanto para dados coletados em rodovias brasileiras, como em outros países.
- Coleta e tratamento dos dados: durante os primeiros 6 meses de projeto, foram comprados os equipamentos usados em coletas de dados de tráfego, além de terem sido realizadas os primeiros levantamentos em campo com o devido tratamento. Para a sequência do projeto, estão previstas outras coletas em campo, com ênfase

para os levantamentos com a utilização do Drone, além da realização de treinamento passa sua utilização.

- Avaliação e escolha do simulador: foi adquirido o simulador escolhido para ser utilizado (Vissim + Viswalk), assim como deve ser realizado o treinamento nas próximas semanas. Foram obtidos os computadores necessários para execução do projeto, com ênfase na simulação de tráfego. Na segunda fase do projeto, o simulador deverá ser devidamente calibrado e validado com os dados encontrados em campo, podendo, assim, ser usado para gerar dados de tráfego e modelos voltados para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples.

Na segunda fase, de 12 meses, entre maio de 2018 e abril de 2019, o restante do projeto será executado. Optou-se por desenvolver o projeto dessa forma para que fosse possível, durante a primeira fase, compreender melhor os recursos que serão gastos nas primeiras etapas, sobretudo na coleta e tratamento dos dados. Sendo assim, a segunda fase, especialmente no tocante ao cronograma físico-financeiro, deverá ser desenvolvida com mais precisão.

7. RESULTADOS ESPERADOS

7.1. INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

As pesquisas que envolvem a obtenção de novas técnicas de determinação do nível de serviço em rodovias são praticamente inexistentes no Brasil. Os principais estudos nessa área são voltados para rodovias de pista simples, mas ainda com importantes lacunas a serem resolvidas (como visto anteriormente). Embora esta proposta não tenha a intenção de ser suficiente para criação de um método de cálculo do nível de serviço em rodovias de pista simples que, efetivamente, possam ser preconizados por agências reguladoras e utilizados pelos órgãos gerenciadores (públicos ou privados), espera-se que ele contribua como forte subsídio nesse sentido.

Ressalta-se, uma vez mais que, no Brasil, o HCM é fortemente utilizado para aferição do nível de serviço, mas sem nenhuma adaptação, o que é fundamental e orientado pelo próprio manual. Além disso, não há garantias de que os métodos do HCM, mesmo adaptados às condições locais, possam fornecer resultados mais reais, em relação ao nível de serviço do campo, do que um método desenvolvido totalmente com base em dados de rodovias brasileiras. Pelo menos dois trabalhos (Utimura et al., 2007; Pereira e Bessa Jr., 2017) indicam que o HCM, sem adaptação às condições locais, fornece valores subestimados do nível de serviço, fazendo com que obras de melhoramento sejam realizadas antes do momento adequado.

7.2. CAPACITAÇÃO TÉCNICA DA EQUIPE ENVOLVIDA

Esta proposta de pesquisa deverá contribuir, substancialmente, para a capacitação técnica dos envolvidos, cuja equipe deverá ser composta por três técnicos auxiliares, um técnico sênior e um coordenador geral. Do ponto de vista dos técnicos auxiliares – que deverão ser alunos de graduação de cursos como Engenharia de Transportes, Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo ou áreas afins – o projeto deverá contribuir para a formação acadêmica deles, tanto por meio da elaboração de trabalhos técnicos-científicos e relatórios, como na experiência em campo com as coletas de dados e na utilização de simuladores de tráfego, complementando a formação de sala de aula.

Por se tratar de um assunto de vanguarda, o projeto também deverá contribuir para a formação tanto do técnico sênior como do próprio coordenador. Com relação ao primeiro, a obtenção de métodos alternativos de cálculo do nível de serviço deverá fazer com que o conhecimento adquirido seja disseminado dentro da própria Concessionária Via040 (ou de outras concessionárias do grupo empresarial que detém a concessão). Com relação ao segundo, é fato que qualquer projeto de pesquisa promove um avanço na forma como o coordenador encara os problemas relacionados com nível de serviço e capacidade de rodovias. O desenvolvimento do projeto, certamente, deverá contribuir para que futuras pesquisas nessa área possam continuar sendo desenvolvidas, fazendo com que o estado da técnica e da arte avance um pouco mais e, conseqüentemente, a sociedade, de alguma forma, ganhe com isso.

8. CUSTO DO PROJETO E CRONOGRAMA FÍSICO-FINANCEIRO

A previsão orçamentária do projeto de RDT ser desenvolvido entre novembro de 2017 e abril de 2018 é de **R\$ 327.144,52 (trezentos e vinte e sete mil cento e quarenta e quatro reais e cinquenta e dois centavos)**.

Cronograma Físico-Financeiro

O cronograma físico-financeiro é apresentado em Anexo.

9. ENTIDADE OU EQUIPE EXECUTORA

Os serviços técnicos especializados serão desenvolvidos pelo DSc. José Elievam Bessa Júnior do CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) com apoio da equipe da CONCESSIONÁRIA DA BR-040 S.A. (VIA040).

Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

DSc. José Elievam Bessa Júnior

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2006). Mestre (2009) e Doutor (2015) em Engenharia de Transportes pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). É Professor Efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, no Departamento de Engenharia de Transportes (Campus I). Atua,

principalmente, nos seguintes temas: Simulação de tráfego, Capacidade e Nível de Serviço, Controle de tráfego urbano e rodoviário e Planejamento dos transportes.

REFERÊNCIAS

ARTESP (2002) **Relatório no. 42**: Procedimentos Práticos para Cálculo da Capacidade Viária e Determinação do Nível de Serviço de Operação. Empresa de Apoio e Gerenciamento (EAG-ARTESP), Setor de Operações.

Bessa Jr., J. E. (2009) **Caracterização do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples do estado de São Paulo**. 134p. Dissertação (Mestrado), EESC-USP, São Carlos.

Bessa Jr., J. E. e J. R. Setti (2011) Derivation of ATS and PTSF Functions for Two-lane, Rural Highways in Brazil. 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, **Procedia Social and Behavioral Sciences**, n. 16, p. 282–292, Stockholm, Sweden.

Bessa Jr., J. E. e J. R. Setti (2015) Avaliação de medidas de desempenho para rodovias de pista simples obtidas a partir de relações fluxo-velocidade. XXIX Congresso Pesquisa e Ensino em Transportes, **Anais...**, Ouro Preto - MG.

Bessa Jr., J. E.; J. R. Setti e S. S. Washburn (2017) Evaluation of Models to Estimate Percent Time Spent Following on Two-Lane Highways. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 143, p. 04017010-1-04017010-9.

Brilon, W.; Weiser, F. (1998) Capacity and speed-flow relationships on rural two-lane highways in Germany. **Transportation Research Circular**: Third International Symposium on Highway Capacity. TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 199-218.

Brilon, W.; Weiser, F. (2006) Two-lane rural highways: the German experience. **Transportation Research Record 1988**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 38-47.

Dixon, M. P.; S. S. Sarepali e K. K. A. Young (2002) Field evaluation of Highway Capacity Manual 2000 analysis procedures for two-lane highways. **Transportation Research Record 1802**, TRB, National Research Council, Washington, D.C, p. 125-132.

DNIT (2006) **Manual de Estudos de Tráfego**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.

Egami, C. Y. (2006) **Adaptação do HCM-2000 para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil**. 240p. Tese (Doutorado) EESC-USP, São Carlos.

FGSV (2001) **Handbuch zur Bemessung von Strassenverkehrsanlagen** (HBS, German Highway Capacity Manual). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Cologne.

FIPE (2010) **Índice de Desempenho Econômico do Transporte**. Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. Disponível em: <<http://www.fipe.org.br/web/index.asp?aspx=/web/indices/idet/default.aspx>>. Acesso em: 1 Fev 2010.

Harwood, D. W.; May, A. D.; Anderson, I. B.; Leiman, L.; Archilla, A. R. (1999) **Capacity and quality of service of two-lane highways**. Final Report, NCHRP Project 3-55 (3). Midwest Research Institute, Kansas City, Mo.

Mon-Ma, M. L. (2008) **Adaptação do HCM-2000 para rodovias de pista simples com faixas adicionais típicas do Estado de São Paulo**. 162p. Tese (Doutorado) EESC-USP, São Carlos.

ODOT (2014) **Modeling performance indicators on two-lane rural highways: the Oregon experience**. Oregon Department of Transportation. Transportation Development Division. Facility Analysis and Simulation Team.

Pereira, H. M. e J. E. Bessa Jr. (2017) Análise comparativa de métodos para cálculo do nível de serviço em rodovias de pista simples. XXXI Congresso Pesquisa e Ensino em Transportes, **Anais...**, Recife - PE.

Polus, A.; Cohen, M. (2009) Theoretical and empirical relationships for the quality of flow and for a new level of service on two-lane highways. **Journal of Transportation Engineering**, ASCE, v. 135, n. 6, p. 380–385.

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.

TCU (2008) **Acórdão 2104/2008 Plenário, processo no 016.189/2008-9**. Tribunal de Contas da União. Disponível em: <http://portal2.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/detalhes_noticias?noticia=777746> Acesso em: 7 Jul 2009.

TRB (2000) **Highway Capacity Manual 2000**. Transportation Research Board. Washington D.C.

TRB (2010) **Production of the Year 2010 Highway Capacity Manual – Project Data**. Transportation Research Board. Disponível em: <<http://144.171.11.40/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=1612>> Acesso em: 23 Fev 2010.

Utimura, F. S.; Setti, J. R.; Mon-ma, M. L. (2007) Verificação da acurácia de estimativas do nível de serviço em rodovias de pista simples no estado de São Paulo. XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**, 2007.

Van As, C. (2003) **The development of an analysis method for the determination of level of service of two-lane undivided highways in South Africa**. Project Summary. South African National Roads Agency Limited.

Yu, Q.; Washburn, S. (2009) **Operational performance assessment for two-lane highway facilities**. Journal of Transportation Engineering, ASCE, v. 135, n. 4, p. 197-205.