

AValiação DO EFEITO DE FAIXAS ADICIONAIS DE SUBIDA EM SEGMENTOS DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

Frederico Amaral e Silva

José Elievam Bessa Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Anáiram Lima Costa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Graduação em Engenharia de Transportes

André Luiz Cunha

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos

Aline Ferreira Andalício

Diego Milli da Costa Velho

Veridianne Soares Nazareth

Concessionária BR-040 S/A

RESUMO

A versão 6 do *Highway Capacity Manual* (HCM), que está em constante revisão, deverá tratar da capacidade e do nível de serviço de rodovias de pista simples com base na Densidade de Veículos em Pelotões (*FD*). No Brasil, há poucos estudos que determinam o impacto de faixas adicionais em rodovias de pista simples, sobretudo envolvendo *FD*, que é o objetivo geral deste trabalho. Para isso, foi obtido um conjunto de dados de tráfego em segmentos de rodovia com o intuito principal de calibrar e validar o simulador de tráfego utilizado nesta pesquisa, o VISSIM. Com o simulador calibrado, foram gerados dados de tráfego em segmentos viários hipotéticos com e sem faixas adicionais, tendo sido ajustados modelos de tráfego. Os resultados da análise dos modelos indicaram que a proposta deste trabalho produziu valores de nível de serviço e de *FD* mais aderentes aos valores que foram observados em campo.

ABSTRACT

The 6th version of the Highway Capacity Manual (HCM), which has been under constant revision, should address capacity and level of service of two-lane highways based on Follower Density (*FD*). In Brazil, there are few studies that have determined the impact of climbing lanes on two-lane highways, especially involving *FD*, which is the objective of this research. To achieve this goal, a set of traffic data was obtained from highway segments with the main purpose of calibrating and validating the traffic simulator used in this research, VISSIM. With the calibrated simulator, traffic data were generated for hypothetical highway segments with and without climbing lanes, and traffic models have been adjusted. The results of this analysis indicated that the models proposed in this work produced level of service and *FD* values more adherent to the values observed in the field.

1. INTRODUÇÃO

A liberdade e a segurança operacional em rodovias de pista simples podem ser prejudicadas caso existam rampas acentuadas e longas que provoquem uma brusca redução da velocidade da corrente de tráfego. Dessa forma, haverá a formação de pelotões e o aumento do atraso médio dos veículos se o fluxo de veículos for alto. As faixas adicionais de subida consistem em uma terceira faixa de tráfego, complementar, implantada nos segmentos com rampa de subida acentuadas para o uso, principalmente, de veículos pesados com baixo desempenho veicular. O objetivo é facilitar o tráfego dos veículos mais rápidos, ao permitir que sejam realizadas as ultrapassagens com segurança e rapidez, sem usar a faixa no sentido oposto, reduzindo o tempo de viagem e melhorando o nível de serviço no segmento (AASHTO, 2001).

Do ponto de vista operacional, o *Highway Capacity Manual* (HCM) é o documento mais usado no mundo para calcular a capacidade e o nível de serviço de componentes viários. Em 2016, foi publicada a 6ª edição do manual (HCM-6). Contudo, ainda não foi disponibilizado o

novo capítulo referente às rodovias de pistas simples, embora tenha sido publicado um relatório (Washburn *et al.*, 2018) que indica como será esse novo método, desenvolvido no âmbito do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP). A Densidade de Veículos em Pelotões (*Follower Density - FD*) deve ser a nova medida de serviço utilizada pelo HCM, voltada para análise de rodovias de pista simples. A *FD* é de fácil obtenção em campo e representa bem as condições da rodovia, sendo também capaz de representar a percepção do usuário e a compatibilidade com outros tipos de rodovias. Esse resultado é corroborado por outras pesquisas (Al-Kaisy *et al.*, 2018; Bessa Jr. e Setti, 2018; Moreno *et al.*, 2018).

Setti (2009) traz uma reflexão sobre a importância de desenvolver métodos e modelos que sejam voltados para a realidade brasileira, uma vez que o HCM vem sendo desenvolvido com dados de tráfego coletados em rodovias norte-americanas. A utilização do HCM sem que, ao menos, seja adaptado para as condições brasileiras tem culminado na subestimação dos níveis de serviço calculados (Utamura *et al.*, 2007; Pereira e Bessa Jr., 2017). No que diz respeito às faixas adicionais de subida em rodovias de pista simples, o método do HCM-6 (ainda sem atualização) leva em consideração o impacto das faixas adicionais. No entanto, não têm sido desenvolvidos trabalhos, no Brasil e no exterior, que buscam avaliar o impacto das faixas adicionais com mais profundidade, especialmente levando em conta a *FD* como medida de desempenho. Este trabalho teve, portanto, essa meta.

2. NCHRP PROJECT 17-65

A proposta do novo método do HCM (Washburn *et al.*, 2018), apresentada no relatório final do NCHRP *Project 17-65*, inclui a categorização em apenas duas classes de rodovias de pista simples, e não mais em três, o que é de entendimento mais objetivo, pois usa o critério de velocidade máxima regulamentar na rodovia. A primeira classe é chamada de rodovias de velocidade elevada (*High-Speed Highways*), com velocidade regulamentar maior ou igual a 80 km/h. A segunda classe é chamada de rodovias de baixa velocidade (*Low-Speed Highways*), cuja velocidade regulamentar é inferior a 80 km/h. Nas rodovias da primeira classe, a velocidade de tráfego e os atrasos são fatores importantes para os motoristas. As rodovias de baixa velocidade, geralmente, servem de ligações entre rodovias de velocidades mais altas e, também, ocorrem em regiões turísticas, apresentando poucas oportunidades de ultrapassagens, fazendo com que os motoristas aceitem velocidades menores.

Foram propostas cinco classes para o alinhamento vertical, em função do comprimento e da rampa do segmento viário. A classe 1 corresponde a um impacto baixo nas condições de tráfego, que vai aumentando até a classe 5, que apresenta um grande impacto na trajetória dos veículos. Da mesma forma, o alinhamento horizontal é categorizado em cinco classes, dados em função do raio e da superelevação das curvas. Portanto, as estimativas das medidas de desempenho para cálculo do nível de serviço são realizadas combinando-se segmentos com curva horizontal e em tangente.

A *FD* (dada em veic/km) reflete a proximidade dos veículos, as oportunidades de realização de manobras de ultrapassagens e o desconforto dos motoristas ao trafegarem em pelotões, e é calculada, para um sentido de tráfego, pela seguinte equação:

$$FD = \frac{PF}{100} \cdot \frac{v_d}{ATS}, \quad (1)$$

em que *PF* é a porcentagem de veículos em pelotões; v_d é o fluxo de tráfego (cpe/h); e *ATS* é a velocidade média de viagem (km/h). O cálculo da *FD* para obter o nível de serviço é realizado

em várias etapas que incluem a realização de ajustes para condições que não sejam básicas.

A *ATS*, na direção de análise, quando o fluxo de tráfego for inferior a 100 veic/h, pode ser considerada igual à velocidade de fluxo livre (*FFS*). Para os segmentos em que o fluxo for maior ou igual a 100 veic/h, deverá ser calculada conforme a equação:

$$ATS = FFS - m \left(\frac{v_d}{1000} - 0,1 \right)^p, \quad (2)$$

em que *m* e *p* são coeficientes que dependem da classe do alinhamento vertical, da *FFS*, da porcentagem de veículos pesados (*P_{hv}*), do fluxo oposto (*v_o*) e do comprimento da faixa adicional (*L*), se houver.

A velocidade de fluxo livre (*FFS*) pode ser determinada diretamente do campo ou calculada pela fórmula:

$$FFS = BFFS - a \cdot P_{hv}, \quad (3)$$

em que *BFFS* é a velocidade de fluxo livre base (km/h), calculada pelo produto da velocidade máxima regulamentada da via por 1,14 (para tangentes); e *a* é um parâmetro que depende de *BFFS*, *P_{hv}*, *L*, *v_o* e da classe do alinhamento vertical. Um ajuste adicional da *BFFS* deve ser realizado para subsegmentos com curva horizontal.

A *PF*, último parâmetro necessário para cálculo da *FD* (Equação 1), pode ser calculada pela equação:

$$PF = 100 \cdot \left[1 - e^{-m \cdot \left\{ \frac{v_d}{1000} \right\}^p} \right], \quad (4)$$

em que *m* e *p* são coeficientes específicos para o cálculo da *PF*.

3. COLETA DE DADOS DE TRÁFEGO

Para atingir a meta traçada neste trabalho, foram desenvolvidos experimentos de simulação de tráfego com o software VISSIM (PTV, 2018), calibrado e validado a partir de dados de tráfego obtidos em rodovias mineiras. A principal base de dados usada neste trabalho consistiu em posicionar câmeras de vídeo nas extremidades e em pontos intermediários de trechos selecionados da rodovia BR-040, em Minas Gerais e Goiás, para obter informações como velocidade média de viagem, composição veicular e *headways* dos veículos.

As coletas de dados foram planejadas levando em consideração a obtenção de correntes de tráfego de modo que se tivesse, tanto quanto possível, um conjunto diverso, seja do ponto de vista da magnitude do fluxo de tráfego, seja considerando a geometria dos trechos. Os dados foram obtidos durante o feriado da Semana Santa de 2018, nos segmentos entre os km's 19 e 29; 29 e 39; 95 e 105; 130 e 140; e 140 e 150, nos dias 29 e 30 de março de 2018 e 1 de abril de 2018, todos com velocidades regulamentares acima de 80 km/h. Outra coleta de dados foi realizada no mesmo ano, mas no feriado da Independência, nos trechos entre os km's 288 e 298; e 359 e 399, nos dias 7 e 9 de setembro de 2018. A amostra obtida possui 177 correntes de tráfego de 15 minutos; dessas, 54 foram coletadas em segmentos com faixas adicionais.

Alguns voos foram realizados com um quadricóptero portátil (drone) Mavic Pro (DJI, 2017) para registrar as ultrapassagens em campo, com o intuito de obter parâmetros de calibração do

VISSIM. De acordo com a legislação brasileira (ANAC, 2017), não podem ser realizados voos com mais de 120 m de altura, o que delimita as observações de trechos de ultrapassagens com comprimento suficiente para observação das manobras. Para corrigir as distorções das distâncias com o drone posicionado em direção ao horizonte, foi utilizado um programa (Cunha, 2013) para transformar a perspectiva das imagens das rodovias de modo que possuíssem um formato retangular, como se o Drone estivesse posicionado de forma perpendicular à rodovia.

Uma vez que não há um modelo específico no VISSIM para curvas horizontais, foi realizada uma coleta de dados, em março de 2019, para obter informações acerca dos comportamentos dos condutores nas curvas horizontais para modelagem no simulador. A coleta foi realizada entre os km's 395 e 404 da BR-040, próximos ao município de Curvelo. Consistiu em acompanhar o trajeto dos veículos leves e pesados no segmento e obter, com um GPS, informações sobre o posicionamento dos veículos. Foram registrados os percursos de 20 automóveis e 10 caminhões, entre leves, médios, pesados e extrapesados, em curvas de raios entre 414 m e 905 m, mediana de 559 m e desvio padrão de 252 m. Foi identificado que a rampa, o raio e o desenvolvimento da curva não apresentaram correlação com a velocidade em curva. Dessa forma, optou-se por uma simplificação, analisando-se a redução de velocidade nas curvas horizontais apenas em função da velocidade em tangente. Assim, foi realizada uma regressão linear ($R^2 = 0,98$) para obtenção do seguinte modelo:

$$v_{curva} = 0,95 \cdot v_{tangente} , \quad (5)$$

em que v_{curva} é a velocidade média dos veículos na curva horizontal; e $v_{tangente}$ é a velocidade média dos veículos em tangente.

4. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO VISSIM

O VISSIM é um dos principais simuladores microscópicos de tráfego usados no mundo e pode ser usado para criar diferentes cenários de tráfego com uma abordagem dinâmica e estocástica (PTV, 2018). Possui submodelos comportamentais, como os de *car-following*, de mudanças de faixa, de aceitação de brechas e de desempenho veicular. Como cada grupo de parâmetros comportamentais de motoristas inclui inúmeras possibilidades de calibração, Hollander e Liu (2008) propõem organizá-los em grupos a fim de determinar quais são efetivamente relevantes para calibração. Esses grupos são: (i) parâmetros facilmente obtidos em campo; (ii) parâmetros disponíveis em estudos anteriores e que podem ser replicados para a situação de análise; (iii) parâmetros que não influenciam os dados de saída e, portanto, não precisam ser selecionados para calibração; (iv) parâmetros que não são necessários na modelagem; e (v) todos os demais parâmetros, que devem ser calibrados por algum método. Sendo assim, não foram considerados para calibração os parâmetros que são voltados para a modelagem de correntes de tráfego de fluxo interrompido (como semáforos) e para simulações mesoscópicas.

4.1. Parâmetros obtidos em campo

Dentre os parâmetros que podem ser obtidos diretamente do campo, há aqueles voltados para o modelo de desempenho de veículos pesados e para a distribuição de velocidades desejadas. O modelo de desempenho dos veículos pesados foi calibrado em Lima *et al.* (2018). As distribuições de velocidades desejadas foram obtidas dos dados pontuais, resultado dos registros da velocidade nos momentos de passagem nas entradas e saídas das seções dos segmentos viários filmados. Com esses dados, foi possível observar os veículos que estiveram em pelotões, com *headways* iguais ou menores que 2,5 segundos (Washburn *et al.*, 2018). Os veículos que foram observados com *headways* maiores que 2,5 segundos são considerados veículos livres,

que, teoricamente, trafegam na velocidade desejada, definição que está em conformidade com o VISSIM.

Ainda assim, restaram 38 parâmetros – relacionados com os submodelos comportamentais – para análise de relevância para calibração. Foi realizado um teste de sensibilidade de modo a verificar quais desses parâmetros comportamentais são mais relevantes (Lacerda, 2016). Consiste em alterar os parâmetros dos modelos do VISSIM a fim de verificar o impacto nos resultados da simulação. Para isso, foram escolhidos, como medidas de desempenho, a *ATS* e a *PF*, por sentido de tráfego. Então, foram calculados Intervalos de Confiança (IC's) das diferenças dos resultados quando cada parâmetro é alterado, em relação aos resultados usando-se os parâmetros *default*. Caso os IC's contenham o zero ou sejam pequenos, a influência do parâmetro na medida de desempenho é considerada pequena.

Para a realização da análise de sensibilidade, foram simulados os segmentos entre os km's 95 e 105, e entre os km's 288 e 298, escolhidos por apresentarem uma maior amplitude de fluxo de tráfego. No VISSIM, para esses trechos modelados, todos os 38 parâmetros comportamentais foram alterados isoladamente, por duas vezes: usando-se os valores mínimo e máximo do intervalo de busca estabelecido para cada parâmetro. Foram obtidos os resultados de simulação que foram comparados com os resultados obtidos com os parâmetros *default*, calculando-se a média, o desvio padrão e o intervalo de confiança das diferenças absolutas dos resultados das simulações. Seis parâmetros foram identificados como relevantes para calibração: (i) *Look Ahead Maximum Distance (LookAheadDistMax)*; (ii) *Observed Vehicles (ObsrvdVehs)*; (iii) *Safety distance reduction fator - lane change (SafDistFactLnCg)*; (iv) *W99cc1Distr*; (v) *W99cc3*; e (vi) *Lateral Minimum Distance at 50 km/h (LatDistDrivDef)*.

Dois desses parâmetros, o *LatDistDrivDef* e o *SafDistFactLnChg*, puderam ser obtidos através das filmagens com o drone. De acordo com o Manual do VISSIM (PTV, 2018), o *LatDistDrivDef* é a distância mínima, em relação à faixa adjacente, mantida pelos veículos que ultrapassam pela faixa do sentido oposto, a 50 km/h. Para calibrar esse parâmetro, foi observado, com o uso do Drone, o comportamento dos veículos quando realizavam as ultrapassagens, capturando-se a distância lateral e a velocidade em que os veículos realizavam as manobras. Foram coletadas informações de 31 manobras de ultrapassagens. A distribuição das distâncias laterais obtidas foi melhor representada pela mediana, devido a assimetria da amostra. Assim, o valor estimado para *LatDistDrivDef* foi de 1,12 m, valor que é menos agressivo que o valor *default* do VISSIM, de 1,00 m.

Apesar de relevante, o *LatDistDrivDef* se mostrou menos impactante na simulação do que o *SafDistFactLnChg*, que é um fator de redução da distância de segurança desejada para a realização das mudanças de faixa, produto da distância de segurança desejada pelo fator de redução da distância de segurança. Esse fator pode ser definido como a razão da distância final de aproximação do veículo que realizar a ultrapassagem pela distância mantida pelos veículos em *following*, mas que não desejam realizar ultrapassagens. De posse das 31 ultrapassagens registradas com o drone, foram coletadas as distâncias que os veículos mantiveram quando atrás de outros veículos e foram observadas as distâncias dos veículos que iniciam as ultrapassagens no limite do início da manobra. O valor *default* do VISSIM para o parâmetro é de 0,6 m, enquanto, para a amostra das ultrapassagens observadas, o parâmetro obtido foi igual a 0,36 m (mais agressivo).

4.2. Calibração dos parâmetros com Algoritmo Genético

Os demais quatro parâmetros relevantes para calibração foram estimados com o uso de um Algoritmo Genético (AG), que é baseado em outro aplicado em estudos anteriores (Bessa Jr. *et al.*, 2017; Bessa Jr. e Setti, 2018). Alguns trabalhos (Lacerda e Castro-Neto, 2014; Lacerda, 2016) têm apontado que, se um processo de calibração não for bem delineado, parâmetros comportamentais dos simuladores de tráfego podem ter valores de calibração inadequados (agressivos demais, por exemplo). Sendo assim, outros parâmetros calibrados também podem ser inadequados, mas em outro sentido (muito conservadores, por exemplo), na tentativa de compensar os erros atribuídos aos primeiros parâmetros. A aplicação tradicional dos AG's para calibrar simuladores de tráfego na obtenção dos parâmetros comportamentais é susceptível a esse tipo de erro.

Para evitar esse problema, a criação da população (de 10 indivíduos) do AG foi baseada no intervalo de busca dos parâmetros de calibração que os compõe, com cada um deles associado a um determinado nível de agressividade: baixo, médio e alto (intervalos de busca divididos em três partes). Cada cromossomo representa um conjunto de parâmetros de calibração que são inseridos nos arquivos de entrada de metade das correntes de tráfego de 15 minutos obtidas por filmagens. A outra metade foi usada para realizar a validação do AG e, também, para validar os modelos de tráfego obtidos. O grau de adaptação (qualidade) de cada indivíduo da população é determinado por meio de uma função objetivo (*fitness*), o somatório dos erros quadráticos (*SE*), que tem, como principal vantagem, penalizar àquelas soluções que produzem grandes erros absolutos. A formulação de *SE* é dada por:

$$SE = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^2 \sum_{w=1}^2 (y_{ikw} - x_{ikw})^2, \quad (6)$$

em que y_{ikw} é a velocidade média de viagem obtida na simulação, para a corrente de tráfego i , sentido de tráfego k (leste ou oeste) e tipo de veículo w (automóvel ou veículo pesado); x_{ikw} é a velocidade média de viagem obtida em campo, para a corrente de tráfego i , sentido de tráfego k e tipo de veículo w ; a variável n representa a metade das correntes de tráfego de 15 minutos da amostra.

Se a máxima geração (30) não tiver sido atingida, os operadores genéticos são acionados para produzir uma nova geração da população. O tipo de seleção de dois indivíduos (pais) para realização de cruzamento (*crossover*) é baseado na técnica da roleta (Goldberg, 1989), em que a probabilidade de serem selecionados é função do seu grau de adaptação ao meio (*fitness*). Portanto, quanto menor for o *SE* do indivíduo, mais chance ele tem de ser selecionado para realização de cruzamento. O novo cromossomo de um indivíduo da geração seguinte possui genes (parâmetros de calibração) que são resultados da média aritmética dos genes dos seus pais. Os outros operadores genéticos, mutação e predação, que ajudam a inserir diversidade na população, possuem, respectivamente, taxas de 30% e 20%, e são aplicadas a cada duas gerações. Com a aplicação do *crossover*, é possível que alguns genes dos indivíduos de uma nova geração da população tenham agressividades diferentes daquelas definidas no início do processo de calibração (baixo, médio ou alto). Nesses casos, cada gene deve ser substituído por um outro produzido aleatoriamente com base no seu respectivo espaço de busca, de acordo com seu nível de agressividade. A esse processo foi denominado “alteração genética”.

Usando-se os valores *default* dos quatro últimos parâmetros relevantes para calibração, foi encontrado um valor de *SE* igual a 10.603. Com a aplicação da melhor solução encontrada

com o AG (um motorista com alta agressividade), obteve-se um valor de *SE* de 9.528, que é 10% menor do que quando usados os valores *default* dos parâmetros. Foi realizado um processo de validação ao testar a melhor solução encontrada na etapa de calibração. Nesse caso, o valor de *SE* encontrado foi de 15.001, que é 4% menor do que o obtido com os parâmetros *default*, igual a 15.635.

A aplicação do AG apresentou uma leve melhora em relação à utilização dos parâmetros *default*. Isso pode ser justificado em função da quantidade pequena de parâmetros a serem calibrados. Além disso, o processo de ajuste dos parâmetros inicia-se, de fato, com a calibração das curvas de velocidades desejadas, dos modelos de desempenho dos veículos pesados e dos dois parâmetros em campo estimados a partir de filmagens com Drone – *LatDistDrivDef* e *SafDistFactLnChg*. Com relação aos resultados dos parâmetros calibrados pelo AG, todos os valores foram considerados mais agressivos dos que os valores *default* do VISSIM: *LookAheadDistMax* = 419 veículos; *ObsrvdVehs* = 7 veículos; e *W99cc3* = -2,6 s. A exceção ficou por conta do *W99cc1Distr*, que permaneceu com o mesmo valor *default* do VISSIM (tipo 1). Mais detalhes sobre a calibração e a validação do VISSIM podem ser vistos em Silva (2019).

5. MODELOS DE TRÁFEGO

A classificação do alinhamento vertical proposta no NCHRP *Project 17-65* (Washburn *et al.*, 2018) é baseada na redução da velocidade de entrada de um veículo pesado típico num trecho com uma rampa. Neste trabalho, foram realizados experimentos de simulação, no VISSIM, de forma a se identificar esses impactos das rampas num veículo pesado típico de projeto com relação massa/potência de 175 kg/kW, que representa o 85º percentil da distribuição de veículos pesados da amostra obtida nesta pesquisa numa balança móvel da BR-040 (Lima *et al.*, 2018). A velocidade de entrada no trecho com rampa foi de 105 km/h, a mesma escolhida nos experimentos para o novo método do HCM. A Tabela 1 ilustra a classificação do alinhamento vertical – ou Classe da Rampa (COG) – obtida para este trabalho, que é significativamente diferente da tabela obtida no NCHRP *Project 17-65*, com implicações importantes na obtenção dos modelos de tráfego.

Tabela 1: Classificação do alinhamento vertical

Comprimento do segmento (m)	Rampa (%)																	
	1	-1	2	-2	3	-3	4	-4	5	-5	6	-6	7	-7	8	-8	9	-9
	Classe da rampa (COG)																	
≤ 200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
≥ 200 < 400	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	3	2	3	3	4	3	4	4
≥ 400 < 600	1	1	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	5	5	5	4	5	5
≥ 600 < 800	1	1	2	2	3	2	4	4	5	4	5	5	5	5	5	4	5	5
≥ 800 < 1000	2	2	3	3	4	3	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
≥ 1000 < 1200	2	2	3	3	4	3	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
≥ 1200 < 1400	2	2	3	3	5	4	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5
≥ 1400 < 2400	3	3	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
≥ 2400	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Com as classificações do alinhamento vertical, foram desenvolvidos modelos que correlacionavam fluxo unidirecional (q_d) e FD , em função de COG, P_{hv} e FFS. Foram criados, no VISSIM, 10 segmentos viários hipotéticos de 10 km para cada COG, alternando-se segmentos de subida e de descida, com a inclinação e o comprimento definidos randomicamente em função da Tabela 1. Os trechos hipotéticos foram usados para gerar modelos: (i) sem faixas adicionais e sem proibição de ultrapassagens (aqui denominados de “modelos-base”); e (ii) com a

inserção de faixas adicionais. A FD de um segmento foi calculada em função da média ponderada dos FD s dos subsegmentos, com o peso sendo o comprimento do trecho.

A FFS foi simulada de 70 a 110 km/h, variando-se de 10 em 10 km/h. Para as porcentagens de veículos pesados (P_{hv}), foram considerados de 0% a 50% da corrente de tráfego, variando-se de 10% em 10%. Considerando as cinco categorias de alinhamento vertical, foram realizadas, portanto, $5 \times 6 \times 5 = 150$ relações fluxo- FD unidirecionais. Para produzir cada um desses modelos, foram simuladas 100 correntes de tráfego, o que resultou em $100 \times 150 = 15.000$ simulações no total. Foi utilizado um modelo quadrático entre q_d e FD_d :

$$FD_d = a.q_d^2, \quad (7)$$

em que a é um parâmetro de calibração. Na Tabela 2, é possível verificar os parâmetros a encontrados para $P_{hv} = 20\%$. Os valores intermediários de a para valores de COG, P_{hv} e FFS diferentes dos apresentados na Tabela 2 devem ser obtidos por meio de interpolação linear. Valores para outras combinações de COG, P_{hv} e FFS podem ser vistos em Silva (2019).

Tabela 2: Parâmetros dos modelos-base de FD_d quadrático, para $P_{hv} = 20\%$

FFS (km/h)	$P_{hv} = 20\%$									
	COG = 1		COG = 2		COG = 3		COG = 4		COG = 5	
	a	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2
70	0,0000083	0,9392	0,0000070	0,9549	0,0000078	0,9522	0,0000112	0,9738	0,0000115	0,9770
80	0,0000080	0,9384	0,0000067	0,9615	0,0000074	0,9597	0,0000110	0,9742	0,0000113	0,9753
90	0,0000080	0,9416	0,0000067	0,9605	0,0000074	0,9606	0,0000109	0,9741	0,0000111	0,9769
100	0,0000078	0,9474	0,0000065	0,9680	0,0000071	0,9662	0,0000103	0,9770	0,0000107	0,9776
110	0,0000077	0,9461	0,0000064	0,9647	0,0000071	0,9653	0,0000100	0,9757	0,0000103	0,9781

Não foi identificada a necessidade de implantação de faixa adicional de subida em nenhum trecho com COG = 1, pois o desempenho dos caminhões é menos afetado pelas rampas, que, por consequência, são mais suaves ou curtas que a das outras classes de alinhamento vertical. Com os resultados das simulações para trechos com faixas adicionais, foram realizadas regressões considerando-se o modelo da Equação 7, com a obtenção de outros parâmetros a . Foram calculados fatores de ajuste para as faixas adicionais de subida, f_{fa} , que consistem na diferença entre a FD_d do modelo-base pela FD_{fas} (FD com faixas adicionais):

$$f_{fa} = FD_d - FD_{fas}. \quad (8)$$

Na Tabela 3, é possível verificar os valores de f_{fa} para COG = 4 e $FFS = 90$ km/h. Os valores intermediários de f_{fa} para valores de P_{hv} e FFS diferentes dos apresentados na Tabela 3 devem ser obtidos por meio de interpolação linear. Valores para outras combinações de COG, P_{hv} e FFS podem ser vistos em Silva (2019).

A Figura 1 apresenta exemplos do modelo-base e do modelo com faixas adicionais para COG = 2 e COG = 5, com $FFS = 110$ km/h e $P_{hv} = 20\%$. O impacto das faixas adicionais foi mais evidente de acordo com as combinações dos parâmetros do modelo FFS , P_{hv} e q_d , mas, principalmente, em função do COG, pois o relevo impacta mais os veículos, especialmente os pesados. Para o COG = 2, a faixa adicional apresentou pouca influência no resultado da FD_d , com a maior redução na FD_d obtida com $P_{hv} = 20\%$ para todas as FFS . Com COG = 5, os maiores f_{fa} foram percebidos com $P_{hv} = 20\%$ para todas as FFS , com exceção da $FFS = 110$ km/h, em que o maior efeito foi observado com $P_{hv} = 30\%$. Para todas as FFS , os menores impactos foram registrados com $P_{hv} = 50\%$.

Tabela 3: Fatores de ajuste para faixas adicionais de subida, com $COG = 4$ e $FFS = 90$ km/h

q_d (veic/h)	P_{hv} (%)					
	0	10	20	30	40	50
	$FFS = 90$ km/h					
200	0,0605	0,0963	0,1105	0,0972	0,0967	0,0945
400	0,2419	0,3851	0,4421	0,3886	0,3870	0,3781
600	0,5442	0,8664	0,9947	0,8744	0,8707	0,8506
800	0,9675	1,5403	1,7684	1,5544	1,5480	1,5122
1000	1,5117	2,4068	2,7631	2,4288	2,4187	2,3629
1200	2,1769	3,4657	3,9789	3,4974	3,4830	3,4025
1400	2,9630	4,7172	5,4157	4,7604	4,7407	4,6312
1600	3,8700	6,1613	7,0736	6,2177	6,1919	6,0489
1800	4,8980	7,7979	8,9525	7,8693	7,8367	7,6557

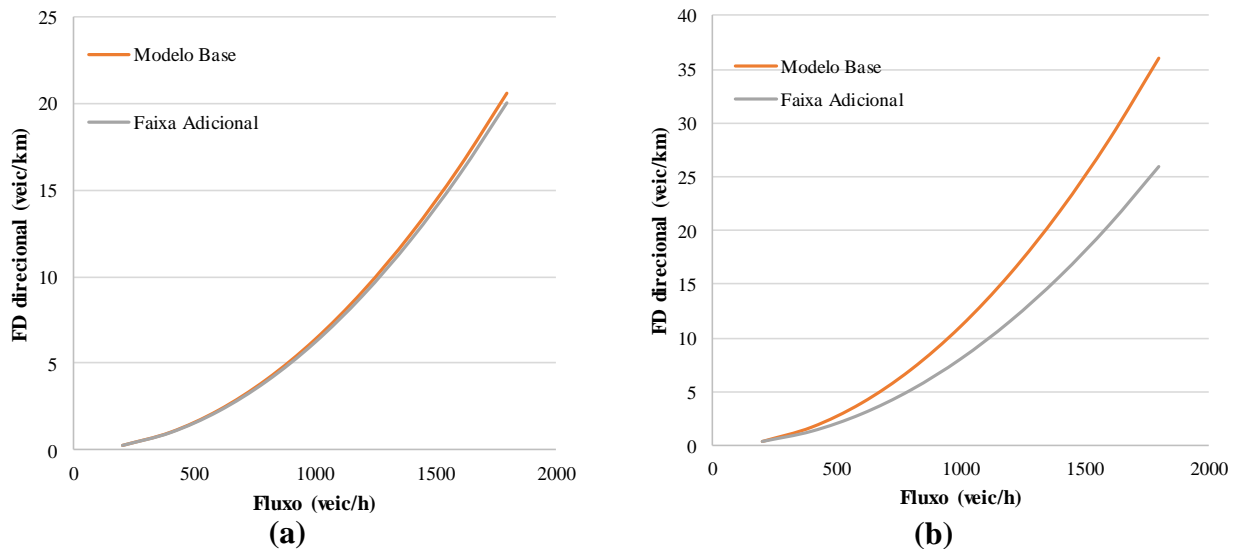


Figura 1: Exemplos de modelo-base e modelo com faixas adicionais para $COG = 2$, $FFS = 110$ km/h e $P_{hv} = 20\%$ (a); e $COG = 5$, $FFS = 110$ km/h e $P_{hv} = 20\%$

Foi estabelecido um critério de determinação do Nível de Serviço de rodovias de pistas simples a partir de FD_d , da forma como proposto por Washburn *et al.* (2018) para o HCM-6. O método consiste em determinar os volumes de serviço – ou seja, aqueles volumes que determinam a mudança do nível de serviço – partindo-se do modelo-base e em condições bem favoráveis ($COG = 1$ e $P_{hv} = 0\%$) para o método do NCHRP *Project 17-65*. Com esses volumes de serviço, determina-se os valores de FD_d correspondentes ao modelo-base, com $COG = 1$ e $P_{hv} = 0\%$, para a proposta deste trabalho. Os valores de FD_d encontrados determinam os intervalos dos diferentes níveis de serviço. Na Tabela 4, é possível encontrar os critérios obtidos para o modelo proposto nesta pesquisa, além do critério do NCHRP *Project 17-65*.

Tabela 4: Critérios de obtenção de nível de serviço em função de FD

Nível de Serviço	FD_d Quadrático	NCHRP <i>Project 17-65</i>	
		Rodovias com $v \geq 80$ km/h	Rodovias com $v \leq 80$ km/h
A	$\leq 1,2$	$\leq 3,2$	≤ 4
B	$> 1,2 - 2,7$	$> 3,2 - 6,4$	$> 4 - 8$
C	$> 2,7 - 4,7$	$> 6,4 - 12,8$	$> 8 - 16$
D	$> 4,7 - 7,4$	$> 12,8 - 19,2$	$> 16 - 24$
E	$> 7,4$	$> 19,2$	> 24

Para comparar cada um dos critérios, foi realizado um processo de validação dos modelos, em que foram calculados os valores de FD_d e os níveis de serviços de metade das correntes de tráfego obtidas em campo. Os resultados da FD_d dos modelos foram comparados com a FD_d obtida diretamente do campo. Conforme demonstrado na Figura 2, o modelo de FD_d proposto neste trabalho apresentou maior proximidade com os resultados de campo do que o modelo do NCHRP *Project 17-65*.

Foram obtidos os níveis de serviços da amostra de validação considerando cada uma das classificações propostas na Tabela 4, conforme apresenta a Figura 3. Os modelos apresentaram níveis de serviço bastante próximos para a FD_d calculada pelos modelos com a FD_d de campo, especialmente para o nível de serviço B. Por outro lado, o critério do NCHRP *Project 17-65* parece subestimar o nível de serviço de campo. Esse resultado demonstra que, se utilizar o HCM sem nenhum tipo de adaptação, o que é comum, os níveis de serviço obtidos tendem a ser piores do que, de fato, são, pelo menos para os casos estudados neste trabalho.

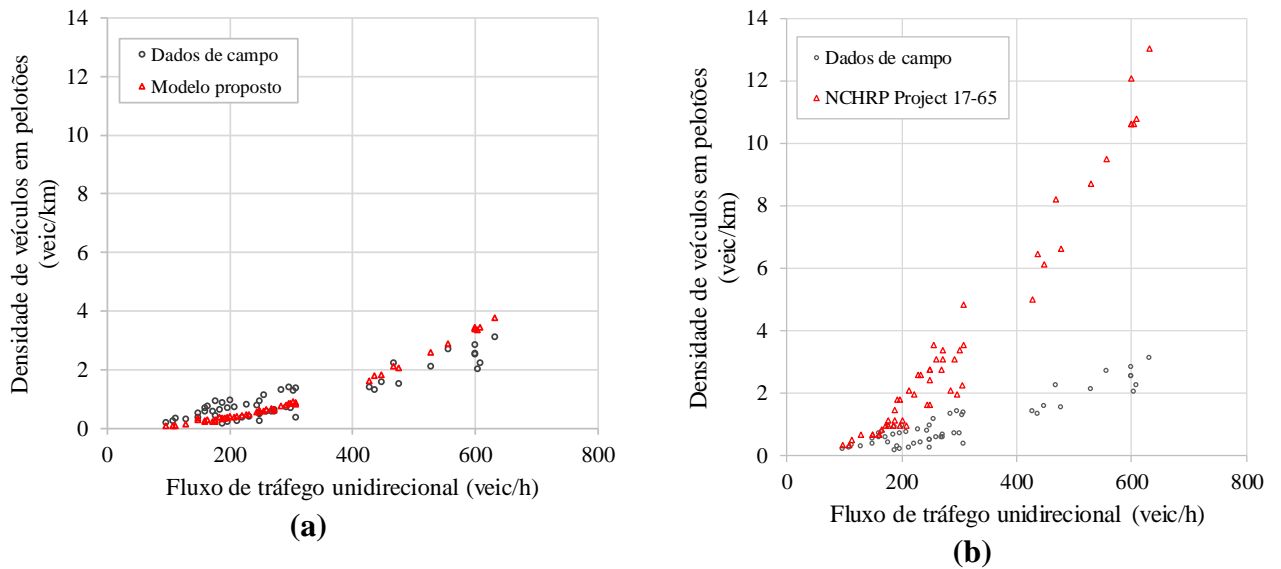


Figura 2: Medidas de desempenho obtidas em campo e obtidas com o modelo proposto (a) e com o NCHRP *Project 17-65* (b)

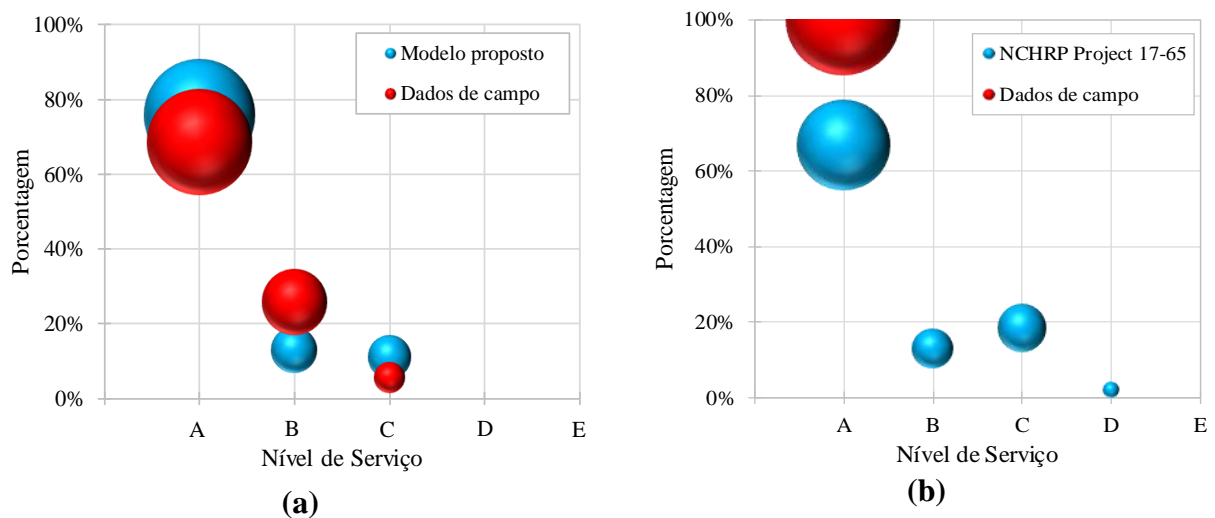


Figura 3: Níveis de serviço obtidos em campo e obtidos com o modelo proposto (a) e com o NCHRP *Project 17-65* (b)

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve, como objetivo principal, determinar o impacto das faixas adicionais de subida na operação de rodovias de pista simples. O simulador VISSIM, devidamente calibrado e validado, foi utilizado para produzir modelos de tráfego com e sem faixas adicionais. A geometria viária foi tratada por meio de cinco classes do alinhamento vertical, denominado de COG. Foram gerados segmentos viários hipotéticos e gerados dados de tráfego por simulação, utilizados para obter modelos de tráfego. Os resultados dessa análise indicaram que o modelo proposto entre fluxo unidirecional e FD produziram valores de nível de serviço e de FD mais aderentes ao que foram observados em campo.

A utilização do novo método do HCM – sem nenhuma adaptação – tende a subestimar o nível de serviço em rodovias brasileiras, o que provocaria investimentos antes do momento adequado. De modo geral, pode-se perceber que, com valores de P_{hv} elevados, a densidade de veículos em pelotões é menos influenciada pela faixa adicional. Para diferentes valores de P_{hv} e valores de COG muito baixos, a faixa adicional não produz grandes efeitos na redução de FD_d . Para COG's iguais a 4 e 5, fica evidente o benefício das faixas adicionais na redução da densidade de veículos em pelotões.

Para trabalhos futuros, é recomendável obter um conjunto de dados de tráfego específico para o comportamento dos condutores em curvas horizontais e, então, verificar precisamente o impacto na densidade de veículos em pelotões, haja vista que, neste trabalho, foi obtido um conjunto pequeno de informações nessas condições. É recomendável, ainda, ampliar as informações sobre os veículos pesados, em especial o comportamento desses veículos em curvas horizontais e, também, a respeito da velocidade desejada por categoria de veículo pesado, pois o VISSIM permite que seja atribuída essa informação para cada tipo de veículo. Um estudo também poderia ser conduzido para segmentos com faixas de ultrapassagens sem aclives.

Para que se possam estabelecer critérios de definição de níveis de serviço com base em FD_d , não foi considerada a percepção dos usuários. O motivo é a complexidade e os custos elevados para se conduzir uma pesquisa abrangente o suficiente para capturar e modelar as impressões dos usuários. Assim, recomenda-se que esse tipo de pesquisa possa ser conduzido futuramente.

Considerando-se a quantidade de fatores de ajustes e a complexidade para obtenção da densidade de veículos em pelotões propostos pelo NCHRP *Project 17-65*, um outro estudo seria adaptar o novo método para condições de rodovias brasileiras, mantendo-se a estrutura do manual.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, pelo apoio financeiro sob número de processo APQ-03818-18, e ao CNPq, pelo apoio financeiro sob os números de processo 312651/2018-0 e 439250/2018-8. Agradecem, ainda, à Concessionária Via040, à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e à CAPES pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2001) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2001.
- Al-Kaisy, A., A. Jafari e S. S. Washburn (2017) Measuring Performance on Two-Lane Highways – Empirical Investigation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2615, n. 1, p. 62-72.
- ANAC (2017) *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC –E nº 94*. Agência Nacional de

Aviação Civil.

- Bessa Jr., J. E e J. R. Setti (2018); Evaluating Measures of Effectiveness for Quality of Service Estimation on Two-Lane Rural Highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, v. 144, p. 04018056.
- 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.
- Cunha, A. L. B. N. (2013) *Sistema automático para obtenção de parâmetros do tráfego veicular a partir de imagens de vídeo usando OpenCV*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DJI (2017) *Mavic Pro: User Manual*, Shenzhen, Guangdong, China.
- Goldberg, D. E. (1989) *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Hollander, Y. e R. Liu (2008) The Principles of Calibrating Traffic Microsimulation Models. *Transportation*, v. 35, n. 3, p. 347–362.
- Lacerda, V. M. (2016) *Estimação da velocidade média em vias urbanas com o uso do microssimulador VISSIM*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará.
- Lacerda, V. M. e M. M. Castro-Neto (2014) Considerações sobre a calibração do modelo de *car-following* do Vissim para vias arteriais urbanas. *Anais do XXVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Curitiba, PR.
- Lima, C. M., L. V. Fleury, F. A. Silva, J. E. Bessa Jr., A. L. Costa, D. M. C. Velho e A. F. Andalício (2018) Caracterização da frota de caminhões da rodovia BR-040 para fins de simulação microscópica com o VISSIM. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Gramado, RS.
- Moreno, A. T., C. Llorca, S. S. Washburn, J. E. Bessa Jr. e A. García (2018) Operational Considerations of Passing Zones for Two-lane Highways: Spanish Case Study. *Promet-Traffic & Transportation*, v. 30, n. 5, p. 601-612.
- Pereira, H. M. e J. E. Bessa Jr. (2017) Análise comparativa de métodos para cálculo do nível de serviço em rodovias de pista simples. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Recife, PE.
- PTV (2018) *VISSIM 10 User Manual*. Planning Transport Verkehr AG – PTV Vision, Karlsruhe, Germany.
- 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.
- Silva, F. A. (2019) *Determinação do impacto de zonas de ultrapassagens proibidas e de faixas adicionais de subida em segmentos de rodovias de pista simples*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Utamura, F. S., J. R., Setti, C.Y. Egami e M. L. Mon-Ma (2007) Verificação da acurácia de estimativas do nível de serviço em rodovias de pista simples no estado de São Paulo. In: XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2007, Rio de Janeiro. *Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2007*. Rio de Janeiro: ANPET.
- Washburn, S. S., D. Watson, Z. Bian, T. Luttinen, A. Al-Kaisy, A. Jafari, R. Dowling e A. Elias (2018) *Improved analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance*. Final Report for NCHRP Project 17-65 National Cooperative Highway Research Program, TRB, Washington, Web-Only Document 255.

Endereço para contato:

MSc. Frederico Amaral e Silva (fred.amarals@gmail.com)

Prof. Dr. José Elievam Bessa Júnior (elievam@etg.ufmg.br ou elievamjr@gmail.com)

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestrado em Geotecnia e Transportes (GeoTrans)

Anáiram Lima Costa (anairamlcosta@gmail.com)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Depto. de Eng. de Transportes (DET)

Prof. Dr. André Luiz Cunha (alcunha@usp.br)

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Depto. de Engenharia de Transportes

Aline Ferreira Andalício (alineferreiraandalicio@yahoo.com.br)

Diego Milli da Costa Velho (Diego.Milli@via040.invepar.com.br)

Veridianne Soares Nazareth (veridianne.nazareth@invepar.com.br)

Concessionária BR-040 S/A (Via040)