

ESTIMATIVA DA DENSIDADE DE VEÍCULOS EM PELOTÕES EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES COM FAIXAS ADICIONAIS

Ana Carolina Felício Bicalho¹
Thais Berger Barbosa da Silva²
Juliângelo Kayo Sangi de Oliveira³
José Elievam Bessa Júnior⁴

1, 2, 3, 4 – Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia
Escola de Engenharia
Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo: As análises de nível de serviço e de capacidade fornecem subsídios para a determinação da oferta em rodovias. O *Highway Capacity Manual*, que está na 7ª edição (HCM-7), é o principal documento para análise de capacidade e nível de serviço no âmbito mundial. Por esse motivo, devem ser realizadas adaptações para o local de aplicação, devido às peculiaridades do tráfego que variam com a localização, afetando os parâmetros comportamentais e veiculares. Nesse sentido, o presente trabalho teve, como principal objetivo, propor um método para estimar a densidade de veículos em pelotões (*FD*), uma medida de serviço usada para análise de rodovias de pista simples. O método proposto foi obtido a partir de dados de tráfego produzidos com um simulador, o Aimsun Next, que foi calibrado para condições locais. Para isso, dados de campo foram coletados em três segmentos de rodovias de pista simples com faixas adicionais, localizados na rodovia BR-040. Os resultados mostraram que o método desenvolvido nesta pesquisa produziu valores de *FD* mais próximos dos observados em campo do que com a utilização do método HCM-7.

Palavras-chave: *Highway Capacity Manual*. Faixa adicional. Nível de Serviço.

Abstract: The analyses of the level of service and the capacity provide subsidies to determine the supply of highways. The Highway Capacity Manual, which is in the 7th version (HCM-7), is the main document for analyzing capacity and level of service worldwide. Therefore, adaptations must be made at the place of application, due to traffic peculiarities that vary with the location, affecting behavioral and vehicular parameters. Thus, the present work had, as its main objective, to propose a method to estimate the follower density, a service measure used to analyze two-lane highways. The proposed method was obtained based on traffic data produced with a simulator, the Aimsun Next, that was calibrated to the local conditions. For this, field data were collected on three two-lane highway segments with passing lanes, located on BR-040 road. The results showed that the developed method in this paper produced *FD* values closer to those found in the field when compared to the values obtained with the HCM-7.

Keywords: *Highway Capacity Manual*. Passing lane. Level of service.

1. Introdução

O nível de serviço de uma rodovia está relacionado com a qualidade de sua operação e retrata aspectos como a fluidez do tráfego, a possibilidade de mudar de faixa e o espaçamento entre os veículos. A capacidade da rodovia possui relação com o número máximo de veículos que são acomodados por ela. Os resultados das análises de nível de serviço e de capacidade fornecem subsídios para a determinação da oferta em rodovias, para avaliação da qualidade de operação de rodovias existentes e para desenvolvimento de políticas de transporte, dentre outros tipos de estudos (Demarchi e Setti, 2000).

Sabe-se que o Highway Capacity Manual, ou HCM (TRB, 2022), é utilizado mundialmente como fonte para as metodologias de análise de nível de serviço e capacidade. Entretanto, o HCM é aplicado na maioria dos estudos sem que haja uma adaptação prévia da sua metodologia para que se adeque às condições observadas localmente, uma vez que tanto os parâmetros comportamentais quanto os aspectos relativos ao tipo de veículo são elementos variáveis de acordo com o local em estudo. Nesse contexto, ao se aplicar a metodologia do HCM incorretamente, os resultados acerca do nível de serviço e da capacidade de determinado sistema viário podem ser imprecisos. Se a realidade não é retratada de maneira verossímil, há a possibilidade de o sistema viário ser subestimado e a análise incorreta implicará em gastos desnecessários com melhorias, enquanto, ao ser superestimado, haverá baixa implementação de melhorias importantes para um bom desempenho do sistema (Paula, 2006).

No Brasil, os estudos de Utimura *et al.* (2007), Bessa Jr. (2015), Pereira e Bessa Jr. (2017), Bessa Jr. e Setti (2018), Silva (2019) e Oliveira (2021) concluem que a adoção do método previsto no manual HCM sem que haja adaptação às condições locais tende a subestimar o nível de serviço em rodovias brasileiras. Tal fato corrobora com a importância da adaptação do método, que pode contribuir para a correta alocação de recursos relacionados com a infraestrutura viária.

As faixas adicionais, de acordo com a definição do HCM, em sua 7ª edição (TRB, 2022), são segmentos curtos, implantados na mesma direção do tráfego, e funcionam como um mecanismo para permitir que veículos mais rápidos ultrapassem veículos lentos. Essa faixa adicional, portanto, é um importante artifício para a dispersão dos pelotões formados em função da presença de veículos mais lentos na corrente de tráfego. Cabe destacar, no entanto, que a eficácia da faixa adicional está relacionada com o fluxo na direção analisada, a porcentagem de veículos pesados, o alinhamento vertical e horizontal e o comprimento da faixa adicional.

Muitos métodos voltados para obtenção do nível de serviço em rodovias são desenvolvidos a partir de simulação de tráfego (Washburn *et al.*, 2018). Os parâmetros comportamentais presentes nesses softwares também estão relacionados com as condições locais de onde foram desenvolvidos. Dessa forma, a simulação de tráfego, com a devida calibração, torna-se indispensável para representar o comportamento dos usuários e o desempenho dos veículos de maneira a alcançar resultados próximos à realidade de campo.

Com a vasta utilização do HCM para análise de rodovias de pista simples, o presente estudo buscou obter um método para estimar a densidade de veículos em pelotões (*FD*), a medida de serviço que é usada na 7ª versão do HCM (TRB, 2022), em segmentos desse tipo de rodovia com faixas adicionais. Esse método foi desenvolvido a partir do simulador de tráfego Aimsun Next (Aimsun, 2020) devidamente calibrado para condições brasileiras. Os resultados de *FD* estimados com o método proposto foram comparados com aqueles encontrados em campo e com os valores obtidos com o HCM-7, tendo sido mais próximos do que foram observados nas rodovias observadas (BR-040).

2. Método proposto

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram realizadas as etapas ilustradas no fluxograma da Figura 1, que são:

1. coleta de dados de tráfego: deve-se obter dados de tráfego, como velocidade média de viagem, fluxo de tráfego e porcentagem de veículos pesados, em segmentos de rodovias de pista simples com faixas adicionais brasileiras; deve-se agregar os dados de 15 em 15

minutos e usá-los tanto para calibração do simulador de tráfego escolhido quando para validar os modelos de tráfego propostos;

2. calibração de parâmetros comportamentais do Aimsun Next: utilização de um Algoritmo Genético para calibrar parâmetros comportamentais do simulador escolhido, o Aimsun Next, de modo que reproduzam adequadamente o comportamento do tráfego em campo; importante ressaltar que outros dados de entrada do simulador devem ser obtidos diretamente em campo, como aqueles relacionados com a distribuição do tempo de viagem e os voltados ao desempenho veicular;
3. simulação com o Aimsun Next: por meio do simulador recalibrado, devem ser simulados trechos hipotéticos da mesma forma como realizado no desenvolvimento do método do HCM-7 para análise de rodovias de pista simples sem faixas adicionais (Washburn *et al.*, 2018); neste trabalho, os experimentos devem conter faixas adicionais;
4. geração de modelos para estimar *FD* em segmentos com faixas adicionais: por meio dos resultados de *ATS* e *PF* obtidos das simulações realizadas no item anterior, foi determinado o *FD* correspondente e gerados os modelos de tráfego para estimar essa medida de serviço de acordo com algumas variáveis explicativas;
5. estimativa dos valores de *FD* dos trechos selecionados: para os trechos observados em campo, deve-se estimar os valores de *FD*, por meio dos modelos encontrados no item anterior, para cada corrente de tráfego de 15 minutos observado em campo; e
6. comparação dos métodos para obter *FD*: deve-se comparar os valores obtidos com os modelos propostos em relação aos valores obtidos em campo e calculados com o HCM-7 sem adaptações; o intuito é validar os modelos propostos no item anterior.

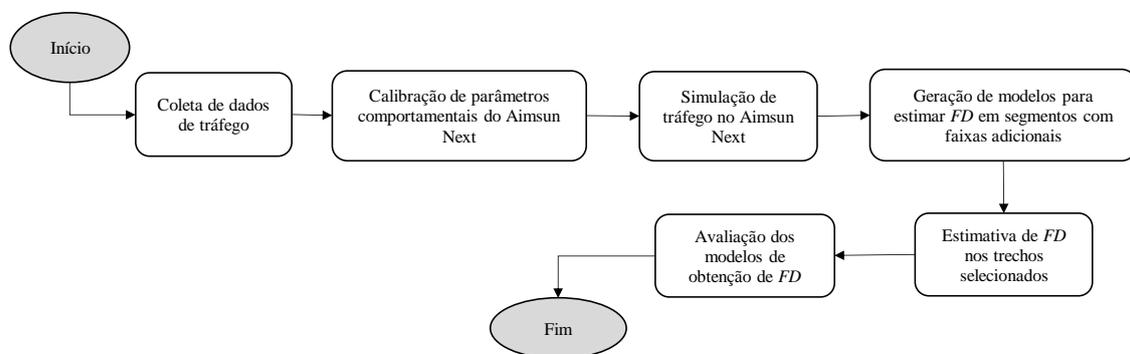


Figura 1 – Fluxograma com as etapas da pesquisa

3. Coleta de dados de tráfego

A coleta de dados de tráfego foi realizada por Silva (2019), que avaliou segmentos com e sem faixas adicionais. No que diz respeito aos trechos com faixas adicionais, que são objetos de análise deste trabalho, foram três os locais, todos presentes na rodovia BR-040, que realiza a conexão de Brasília (DF) ao Rio de Janeiro (RJ). Foram reunidos dados de tráfego como velocidade, fluxo e a porcentagem de veículos pesados, além de dados relacionados ao desempenho dos veículos. Foram levantados, ainda, informações sobre os alinhamentos verticais e horizontais dos segmentos. As características geométricas dos segmentos rodoviários também foram levantadas, uma vez que essas são relevantes na obtenção das medidas de desempenho de interesse.

Os trechos observados possuíam cerca de 10 quilômetros de extensão, correspondentes aos seguintes marcos quilométricos: i) Trecho 1: quilômetro 29 ao 39; ii) Trecho 2: quilômetro 96 ao 105; e iii) Trecho 3: quilômetro 288 ao 298. A caracterização geométrica dos segmentos pode ser vista nas Figuras 2 a 4, em que podem ser observados os perfis altimétricos e a localização das faixas adicionais ao longo dos trechos. Mais informações sobre os dados de tráfego coletados podem ser encontradas em Silva (2019) e em Oliveira (2021).

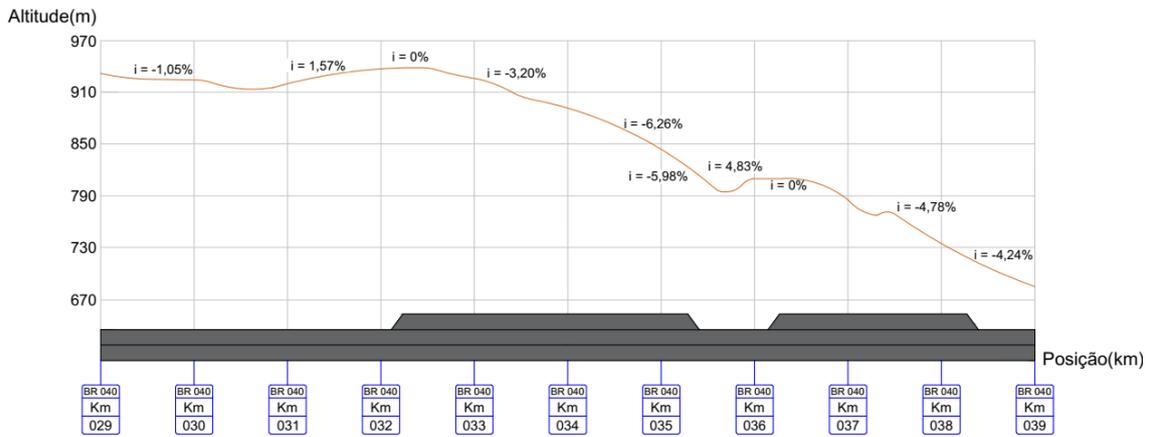


Figura 2 – Perfil altimétrico e localização das faixas adicionais (Trecho 1)

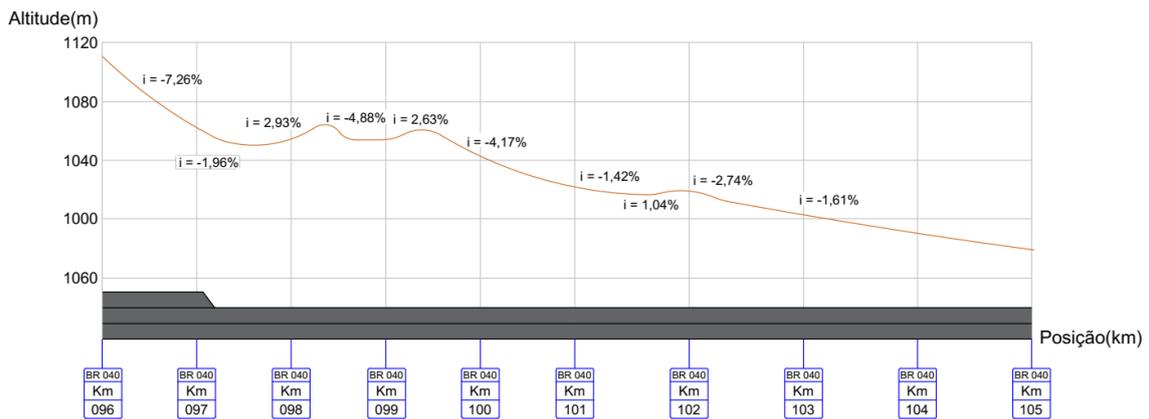


Figura 3 – Perfil altimétrico e localização das faixas adicionais (Trecho 2)

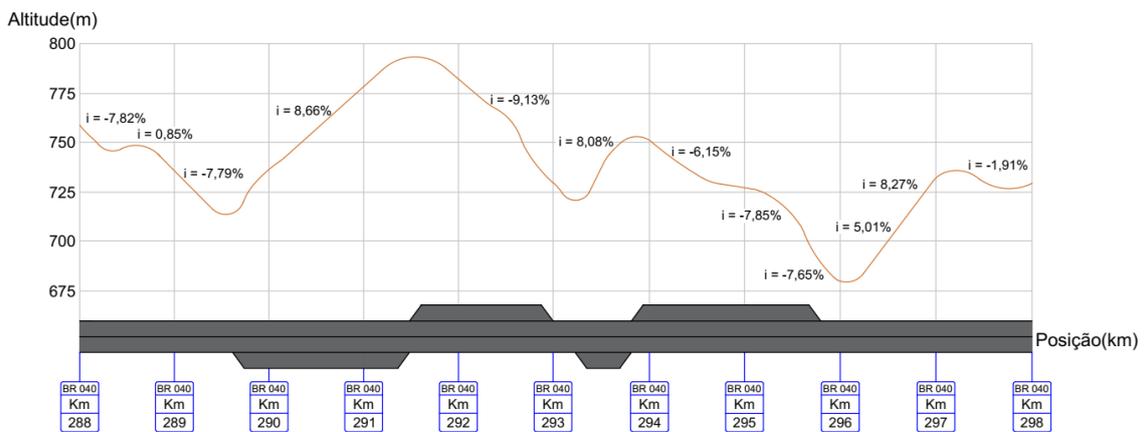


Figura 4 – Perfil altimétrico e localização das faixas adicionais (Trecho 3)

4. Calibração dos parâmetros comportamentais do Aimsun Next

Os parâmetros de calibração presentes em submodelos de microssimuladores de tráfego podem influenciar significativamente nos resultados obtidos. Sendo assim, foi necessário calibrar o *software* escolhido para desenvolvimento desta pesquisa, o Aimsun Next. Dados de tráfego da rodovia BR-040 foram coletados em Silva (2019) para realização da calibração e validação do simulador utilizado (nesse caso, o Vissim). Neste trabalho, o método de calibração utilizado assemelha-se com o realizado em Oliveira (2021) para o Aimsun Next, que avaliou segmentos de rodovias de pista simples sem faixas adicionais.

De acordo com Figueiredo *et al.* (2014), no Aimsun Next há uma categorização dos parâmetros de calibração de acordo com três grandes grupos, independentemente das redes a serem modeladas. Esses parâmetros podem ser: parâmetros globais, locais ou do tipo de veículo. Os parâmetros globais afetam todos os veículos, de qualquer tipo, ao dirigir em qualquer local da rede. Por outro lado, os locais são relativos a uma seção (trecho da rodovia modelado) específica e, quando os veículos trafegam nessa seção, acabam sendo influenciados por esse tipo de parâmetro. Por fim, os parâmetros do tipo de veículo por sua vez afetam todos os veículos especificados.

Nessa perspectiva, para que os resultados sejam representativos da realidade observada em campo, foram inseridos tanto os parâmetros relacionados ao desempenho dos veículos pesados quanto os outros parâmetros comportamentais do simulador. Portanto, no que diz respeito aos veículos pesados, foram inseridas, como *input* do Aimsun Next, as informações apresentadas na Tabela 1, por categoria veicular.

Tabela 1 – Dados relacionados com o desempenho veicular de cada categoria veicular, inseridos no Aimsun Next

Categoria	Área Frontal (m ²)	Massa (kg)		Relação massa potência (kg/cv)		Relação massa/área frontal (kg/m ²)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Leves	5,39	9113	3418	58	22	1691	634
Médios	6,56	18190	6100	68	23	2773	930
Pesados	7,20	33994	10466	101	27	5409	1454
Extrapesados	7,96	55966	17296	128	40	7031	2173

Além disso, foi preciso realizar o ajuste dos parâmetros comportamentais do Aimsun Next. Inicialmente foi realizada a definição de quais deles seriam relevantes para a medida de desempenho a ser analisada que, no caso da presente pesquisa, foi o tempo médio de viagem. Essa definição está relacionada aos modelos comportamentais simulados.

Os parâmetros de calibração do Aimsun Next – que podem estar relacionados com os submodelos comportamentais de *car-following*, *gap-acceptance* e *lane-changing* – são difíceis de serem obtidos no campo, principalmente, pela dificuldade de mensurar seus comportamentos isoladamente. Além disso, existem em grande quantidade e requerem uma variedade de informações para, de fato, serem compreendidos e estimados. Na literatura são encontrados inúmeros parâmetros que podem ser calibrados de acordo com cada necessidade e, por este motivo, para a efetiva calibração do modelo de simulação, se faz necessário o uso de algoritmos, visando viabilizar a calibração por meio da automatização de parte do processo. Neste trabalho, foram calibrados os seguintes parâmetros do Aimsun Next, que foram selecionados, por meio de uma análise de sensibilidade desenvolvida em Oliveira (2021), como sendo os mais significativos:

- *MINCHEADMCAR*: headway mínimo entre os veículos líder e seguidor; considerado no cálculo da velocidade e na desaceleração veicular num dado instante;
- *NDECMCAR*: desaceleração normal média do veículo líder, para automóveis;
- *SNSTVTFCTRDCD*: fator de sensibilidade que altera a percepção da distância de visibilidade e, conseqüentemente, a agressividade na execução de uma manobra de ultrapassagem;
- *SPDIFMAX*: valor máximo da diferença de velocidade entre os veículos líder e seguidor que determina se uma ultrapassagem é desejada;
- *SPDIFMIN*: valor mínimo para a diferença de velocidade entre os veículos líder e seguidor que determina se há desejo por uma ultrapassagem;
- *DLTRSHLD*: limite máximo de atraso provocado por um veículo líder, que também afeta o desejo por ultrapassagens;
- *RNKTRSHLD*: posição máxima na fila em que os veículos ainda possuem alguma chance de ultrapassagem.

Nesse sentido, no presente estudo foi aplicado um Algoritmo Genético (AG) para calibrar o Aimsun Next considerando-se, isoladamente, os três segmentos de pista simples com faixas adicionais com dados coletados em campo. O objetivo é encontrar um conjunto de parâmetros de calibração que melhor represente o comportamento médio observado em campo, a fim de se modelar outras condições hipotéticas, necessárias neste trabalho. Assim, após aplicação do AG, em condições similares às aplicações do algoritmo em Oliveira (2021) – ou seja, 30 gerações e uma população de 10 indivíduos – foi identificado que os trechos se comportavam de forma diferente entre si.

A aplicação do AG envolvia a geração de soluções que eram categorizadas de acordo com a agressividade do conjunto motorista/veículo. O espaço de busca em função da agressividade pode ser visto na Tabela 2, bem como os valores *default* dos parâmetros escolhidos para calibração. Os melhores conjuntos de parâmetros de calibração obtidos pelo AG estão ilustrados na Tabela 3. Diante dos resultados obtidos para os parâmetros calibrados, verificou-se certa diferença no intervalo de busca para os três segmentos analisados. Cada um deles apresentou um grau de agressividade diferente, que se justifica pelas características geométricas bem distintas entre os trechos, tanto em relação ao perfil vertical como em relação à presença de faixas adicionais (Figuras 2 a 4).

Tabela 1 - Valores default e espaço de busca dos parâmetros de calibração do Aimsun Next

Parâmetro	Valor <i>default</i>	Espaço de busca em função do nível de agressividade					
		Baixo		Médio		Alto	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
<i>NDECMCAR</i> (m/s ²)	4,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	5,0
<i>MINCHEADMCAR</i> (s)	1,0	0,9	1,2	0,6	0,9	0,3	0,6
<i>DLTRSHLD</i> (s)	60,0	210,0	300,0	120,0	210,0	30,0	120,0
<i>SPDIFMAX</i> (km/h)	35,0	46,7	60,0	33,3	46,7	20,0	33,3
<i>RNKTRSHLD</i>	2,0	1,0	3,0	3,0	5,0	5,0	7,0
<i>SPDIFMIN</i> (km/h)	10,0	15,0	20,0	10,0	15,0	5,0	10,0
<i>SNSTVTFCTRDCD</i>	0,65	1,33	2,0	0,67	1,33	0,0	0,67

Tabela 2 - Parâmetros calibrados obtidos por meio do AG
Trecho (km)

Parâmetro	Trecho (km)		
	29-39	96-105	288-298
<i>NDECMCAR</i>	3,73	4,12	2,74
<i>MINCHEADMCAR</i>	0,84	0,31	1,04
<i>DLTRSHLD</i>	161,51	64,13	260,72
<i>SPDIFMAX</i>	42,23	24,45	51,78
<i>RNKTRSHLD</i>	4,66	5,57	2,62
<i>SPDIFMIN</i>	12,64	7,20	16,03
<i>SNSTVTFCTRD</i>	0,92	0,28	1,70

Nesse sentido, com o intuito de estabelecer o comportamento do motorista típico brasileiro para a realização das simulações e, em seguida, criação dos modelos para estimação de *FD* em segmentos com faixa adicional, considerou-se, assim como nos estudos realizados por Oliveira (2021), os parâmetros relacionados a um grau de agressividade alta. Sendo assim, os valores a serem inseridos no Aimsun Next para dar continuidade ao trabalho são os do trecho compreendido pelos quilômetros 96 ao 105. Importante dizer que os resultados da calibração produziram valores do tempo de viagem obtidos no segmento mais próximos do campo do que quando os parâmetros comportamentais *default* do simulador foram utilizados nas simulações.

5. Simulação de tráfego no Aimsun Next

O modelo proposto nesta pesquisa para estimar a *FD* em segmentos com faixas adicionais foi desenvolvido a partir de simulações de tráfego em cenários hipotéticos, que são os mesmos realizados para desenvolver o método da 7ª versão do *Highway Capacity Manual* (HCM-7), para análise de rodovias de pista simples (Washburn *et al.*, 2018). Seguindo essa premissa, foram simulados diversos cenários variando-se a inclinação e o comprimento do trecho em análise, conforme também realizado em Oliveira (2021) e ilustrado na Figura 5. No modelo simulado, foram inseridos detectores na seção com a faixa adicional, de modo que eles ficassem posicionados em locais específicos: no início, no centro e no final do segmento de análise (o segundo). Esses detectores têm a finalidade de permitir o registro das medidas de desempenho que trafegam no trecho nos variados cenários simulados.

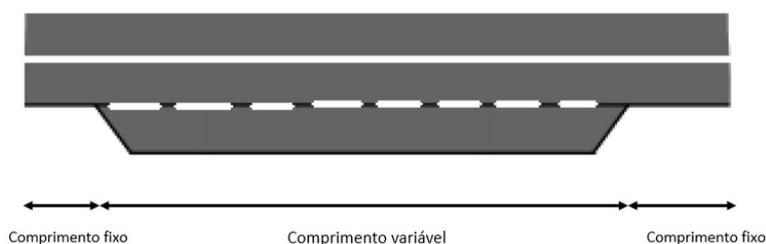


Figura 5 – Croqui dos trechos simulados

Portanto, foram simulados conforme apresentado na Tabela 4, variando-se o comprimento do segmento com faixa adicional, a velocidade de fluxo livre, o fluxo de tráfego direcional, a porcentagem de veículos pesados e o fluxo de tráfego no sentido oposto. Conforme realizado no desenvolvimento do HCM-7 (Washburn *et al.*, 2018) e em Oliveira (2021), os experimentos de simulação levavam em consideração o alinhamento vertical, definidos de acordo com a sua classificação (de 1 a 5, com o relevo mais desfavorável ocorrendo na classe 5).

Variável	Valores utilizados
Comprimento do segmento (km)	0,8 - 1,6 - 3,2 - 4,8
Velocidade de fluxo livre (km/h)	72 - 80 - 89 - 97 - 105 - 113
Fluxo direcional (veic/h)	100 - 300 - 600 - 900 - 1200 - 1500 - 1800
Porcentagem de veículos pesados (%)	0 - 5 - 10 - 15 - 20 - 25
Fluxo no sentido oposto (veic/h)	0
Classe vertical	1 - 2 - 3 - 4 - 5

6. Geração de modelos para estimação de FD em segmentos de rodovias de pista simples com faixas adicionais

Segundo o HCM-7 (TRB, 2022), a obtenção do nível de serviço de uma rodovia de pista simples deve ser realizada por meio da densidade de veículos em pelotões (FD , em veic/km), que é calculada em função da porcentagem de veículos em pelotões (PF), do fluxo de tráfego unidirecional (q , em veic/h) e da velocidade média de viagem (ATS , em km/h):

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

Os resultados obtidos dos diversos cenários de simulação incluíam o registro dos valores de PF e de ATS . De posse dessas informações, uma série de modelos multilíneares foram desenvolvidos para estimar a ATS em segmentos com faixas adicionais. As variáveis explicativas que tiveram correlação com ATS foram o fluxo de tráfego no sentido da análise, a porcentagem de veículos pesados (PHV), o comprimento da faixa adicional (L) e a velocidade de fluxo livre (FFS). A forma geral do modelo é ilustrada pela equação (2):

$$ATS = a + b1 \cdot q + b2 \cdot PHV + b3 \cdot L + b4 \cdot FFS \quad (2)$$

Os coeficientes da equação (2) variam de acordo com a classificação vertical e podem ser encontrados na Tabela 4, de acordo com a classe vertical da rodovia. A mesma metodologia foi realizada para a estimação da medida de desempenho PF . No entanto, foi observado que menos variáveis poderiam ser consideradas como explicativas do modelo, uma vez que é uma variável dispersa e que pode apresentar certo grau de incerteza (Al-Kaisy *et al.*, 2018). Sendo assim, a equação obtida para PF possui o formato ilustrado na equação (3). Da mesma maneira que a equação de ATS , os valores de a' e $b1'$ da equação (3) variam conforme a classe do alinhamento vertical do segmento. Os coeficientes são apresentados na Tabela 5.

$$PF = a' + b1' \cdot q \quad (3)$$

Classe vertical	Coeficientes				
	a	$b1$	$b2$	$b3$	$b4$
1	25,1112	-0,0146	-0,2815	0,7864	1,1554
2	56,0679	-0,0268	-0,6587	0,5069	2,0500
3	36,7571	-0,0176	-0,4698	0,6728	1,2198
4	38,8940	-0,0182	-0,5391	1,1127	0,6546
5	53,2654	-0,0219	-0,8400	-0,1130	0,5555

Tabela 5 - Coeficientes por classe da rodovia para estimar *PF*

Classe vertical	a'	$b1'$
1	9,9628	0,0400
2	12,1911	0,0371
3	10,6306	0,0391
4	10,7628	0,0390
5	11,2356	0,0383

7. Obtenção de *FD* dos trechos observados

Nesta etapa do método proposto, o objetivo foi estimar a *FD* das correntes de tráfego dos três trechos com dados coletados em campo. O intuito foi de validar os modelos desenvolvidos na etapa anterior, ao se comparar os valores de *FD* obtidos dessas relações propostas com aqueles valores encontrados em campo e por meio do HCM-7 sem calibração.

Tabela 7: Adaptação da classificação do alinhamento vertical do HCM-7, realizado em Oliveira (2021) (descidas em parênteses)

Distância (km)	Rampa (%)									
	≤ 1	> 1 ≤ 2	> 2 ≤ 3	> 3 ≤ 4	> 4 ≤ 5	> 5 ≤ 6	> 6 ≤ 7	> 7 ≤ 8	> 8 ≤ 9	> 9
≤ 0,16	1 (1)	1 (2)	2 (3)	2 (4)	2 (4)	2 (4)	2 (5)	2 (5)	2 (5)	2 (5)
> 0,16 ≤ 0,32	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	4 (5)	4 (5)	4 (5)	4 (5)
> 0,32 ≤ 0,48	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0,48 ≤ 0,64	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0,64 ≤ 0,80	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0,80 ≤ 0,96	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0,96 ≤ 1,12	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 1,12 ≤ 1,28	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 1,28 ≤ 1,44	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 1,44 ≤ 1,60	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 1,60 ≤ 1,76	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 1,76	1 (1)	1 (3)	2 (4)	3 (5)	4 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)

Os trechos foram segmentados de acordo com a presença de faixa adicional e quanto à inclinação e o comprimento dos subsegmentos, determinando, para cada um deles, a classe da rodovia (de 1 a 5), conforme Tabela 7 (Oliveira, 2021). O cálculo de *FD* nos subsegmentos sem faixas adicionais é realizado por meio do método do HCM-7 adaptado para condições brasileiras presente em Oliveira (2021). Para subsegmentos com faixas adicionais, são utilizados os modelos apresentados no item anterior para estimar *ATS* e *PF* e, conseqüentemente, *FD*.

Após ser calculado o valor de *FD_i* para cada um dos subsegmentos de comprimento L_i , foi realizada uma média ponderada para obter o valor de *FD* representativo de todo o trecho de tamanho L_t , conforme a equação (4):

$$FD = \frac{\sum_0^i FD_i \cdot L_i}{L_t} \quad (4)$$

8. Comparação dos métodos de estimação da *FD*

Para avaliar os resultados de *FD* encontrados com os modelos propostos, foi realizada uma comparação dos valores obtidos com os modelos propostos, obtidos em campo e

calculados com o HCM-7 sem adaptações (Figuras 6 a 10). Dessas figuras, é possível notar que, para todos os trechos, o modelo proposto a partir dos resultados da simulação de tráfego se aproximou do que foi observado no campo. Quando comparado aos resultados do método proposto no HCM-7, sem adaptações, os resultados de FD divergem do que é observado em campo, sobretudo para o trecho 2 (km 96 a 105, da BR-040).

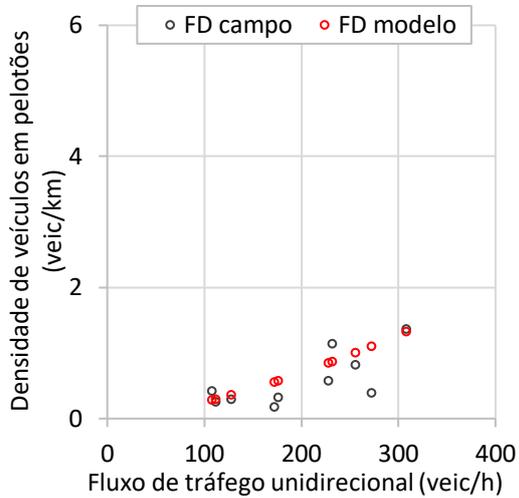


Figura 6 – Modelo X Campo (Trecho 1)

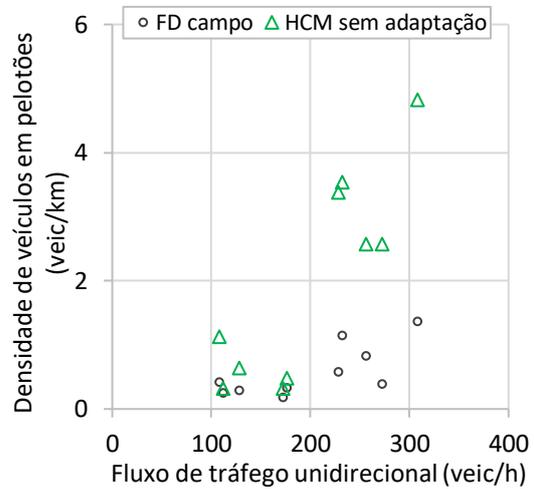


Figura 7 – HCM7 x Campo (Trecho 1)

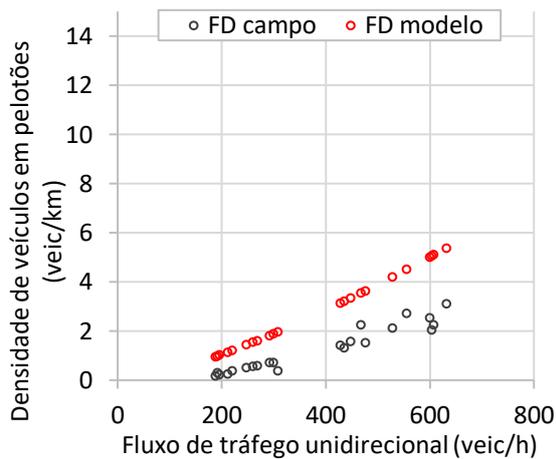


Figura 8 – Modelo X Campo (Trecho 2)

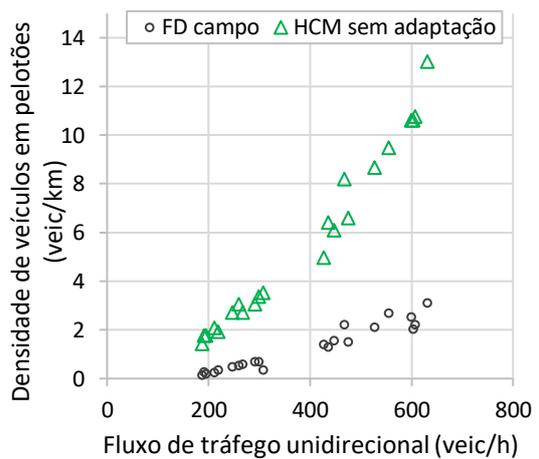


Figura 9 – HCM7 x Campo (Trecho 2)

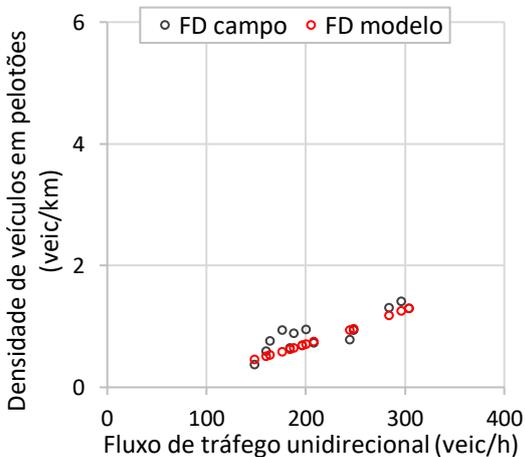


Figura 10 – Modelo X Campo (Trecho 3)

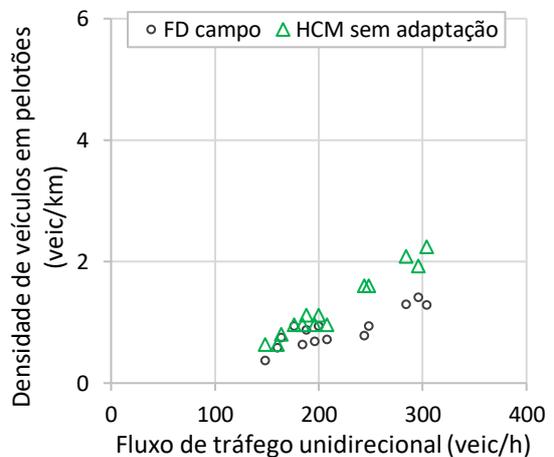


Figura 11 – HCM7 x Campo (Trecho 3)

Os dados de *FD* presentes nas Figuras 6 a 10 foram avaliados por meio da aplicação do teste t-student para amostras pareadas (Tabela 8). Para os três trechos, no caso da análise entre os dados de campo e estimados pelo HCM-7 sem adaptações, a hipótese nula, de que a diferença média entre os pares é igual a zero, foi rejeitada. Isso significa que há indícios de que os dados provêm de populações distintas, ou seja, os dados de campo não estão próximos dos dados estimados pelo HCM-7 sem adaptações. Por outro lado, a hipótese nula não foi rejeitada quando os dados de *FD* de campo foram comparados com os valores encontrados pelo modelo proposto neste trabalho; a exceção ficou por conta do trecho 2, cujas diferenças, de fato, podem ser vistas na Figura 7.

Tabela 8: Resumo da análise estatística

Conjuntos de dados testados	Teste t-student para amostras pareadas					
	\bar{d}	s_d	<i>N</i>	<i>t</i> crítico	<i>t-stat</i>	Rejeita <i>H</i> ₀ ?
Campo x modelo proposto (trecho 1)	0,15	0,28	10	2,262	1,65	NÃO
Campo x HCM-7 sem adaptação (trecho 1)	-1,40	1,27	10	2,262	-3,49	SIM
Campo x modelo proposto (trecho 2)	1,55	0,70	22	2,080	10,37	SIM
Campo x HCM-7 sem adaptação (trecho 2)	-4,34	2,73	22	2,080	-7,47	SIM
Campo x modelo proposto (trecho 3)	-0,08	0,15	14	2,160	-2,14	NÃO
Campo x HCM-7 sem adaptação (trecho 3)	-0,39	0,31	14	2,160	-4,67	SIM

9. Considerações Finais

Nesta pesquisa, foram desenvolvidos modelos de tráfego para estimar *ATS* e *PF* em trechos de rodovias de pista simples com faixas adicionais. Com essas medidas de desempenho, é possível encontrar outra medida de desempenho, a densidade de veículos em pelotões (*FD*), que atualmente é utilizada pela 7ª versão do HCM (TRB, 2022) para estimar o nível de serviço em rodovias de pista simples. Os resultados mostraram que o método desenvolvido nesta pesquisa produziu valores de *FD* mais próximos dos observados em campo do que com a utilização do método HCM-7. Essa conclusão reforça a necessidade de uma adaptação do método do HCM-7, ou a produção de outros modelos locais, em acordo com as condições observadas em rodovias de pista simples brasileiras (com faixa adicional, no caso deste trabalho).

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Aumentar do conjunto de dados de tráfego, ampliando o número de trechos de rodovias de pista simples brasileiras; importante ter comprimentos de faixas adicionais com tamanhos maiores do que alguns observados neste trabalho, especialmente a presente na BR-040 entre os km's 96 e 105.
- Reavaliar a calibração do Aimsun Next, tendo em vista a possibilidade de aumento do conjunto de dados; e
- Adaptar do método do HCM-7 para análise de rodovias de pista simples brasileiras com faixas adicionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (processo TEC-APQ-03818-18) e ao CNPq (processos 315001/2021-6 e 439250/2018-8) pelo apoio financeiro, além da CAPES.

Referências

AIMSUN (2020) **Aimsun Next 20: Dynamic Simulators User's Manual**. Barcelona, Espanha.

AL-KAISY, A. *et al.* Traffic operations on rural two-lane highways: a review on performance measures and indicators. **Transportation Record Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2672: p. 66–74. 2018.

AMARAL, Frederico. *et al.* Avaliação do efeito de faixas adicionais de subida em segmentos de rodovias de pista simples. **Transportes**, v. 29, n. 2, p. 2359-2359. 2021.

BESSA JR., José Elievam. **Medidas de desempenho para avaliação da qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil**. Tese (Doutorado), Universidade do Estado de São Paulo, São Carlos. 2015. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-10062015-102520/pt-br.php>. Acesso em: 21 set. 2022.

DEMARCHI, Sérgio Henrique; SETTI, José Reynaldo. **Análise de Capacidade e Nível de Serviço de Segmentos Básicos de Rodovias utilizando o HCM 2000**. Universidade Estadual de Maringá e Universidade de São Paulo. 2000. Disponível em http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/412_aula_6_-_pista_simples.pdf. Acesso em: 21 set. 2022.

FIGUEIREDO, Miguel; SECO, Álvaro; SILVA, Ana Bastos. Calibration of Microsimulation Models – The Effect of Calibration Parameters Errors in the Models Performance. **Transportation Research Procedia**, [S.L.], v. 3, p. 962-971. 2014.

OLIVEIRA, Juliângelo de. **Adaptação do HCM-6 para análise de rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil**. 100f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2021. Disponível em <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/41823> . Acesso em: 21 set. 2022.

SILVA, Frederico. **Determinação do impacto de zonas de ultrapassagens proibidas e de faixas adicionais de subida em segmentos de rodovias de pista simples**. 185f. Dissertação (Mestrado em Transportes), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2019. Disponível em <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/30497>. Acesso em: 21 set. 2022.

TRB. **Highway Capacity Manual, 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis**. Transportation Research Board. Washington D.C. 2022.

WASHBURN, Scott *et al.* **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. 2018.