

Análise de intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples



Igor Vieira Santos

Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil

José Elievam Bessa Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Recibido: 13.02.2023. Aceptado: 05.07.2024.

Resumo

Quando ocorrem problemas operacionais em rodovias de pista simples, muitos gestores consideram a duplicação como principal opção. Entretanto, configurações como faixas adicionais e rodovia “2+1” constituem soluções intermediárias largamente empregadas em outros países para melhoria das condições operacionais. Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho foi analisar as condições operacionais de intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples, tais como i) faixa adicional; ii) rodovia 2+1; iii) duplicação. O método proposto possui duas etapas principais: i) coleta e tratamento dos dados; ii) análise operacional por meio da determinação dos níveis de serviço utilizando a 6^a e 7^a edições do HCM. Os resultados da aplicação do HCM-7 indicaram que as faixas adicionais podem promover a melhoria de um nível de serviço, o que pode perdurar por sete a dez anos. Da mesma forma, as rodovias 2+1 podem melhorar a condição operacional durante 16 anos, dispensando a duplicação da rodovia nesse período. Trechos com relevo plano apresentaram resultados (obtidos com o HCM-6) que demoram em média 6 anos para se equivalerem aos resultados obtidos para trechos com relevo ondulado, representando uma vantagem do ponto de vista operacional. Os níveis de serviço obtidos com o HCM-7 foram consideravelmente melhores do que aplicando o HCM-6. A diferença para atingir o nível de serviço “D” para relevo ondulado, entre os dois manuais, foi de 20 anos.

PALAVRAS-CHAVES: CAPACIDADE. FAIXAS ADICIONAIS. RODOVIA 2+1. NÍVEL DE SERVIÇO. RODOVIAS DE PISTA SIMPLES.

Analysis of widening interventions of two-lane rural highways

Abstract

When operational problems occur on two-lane rural highways, many managers consider duplication as the main option. However, configurations such as passing lanes and “2+1” roads are intermediate solutions widely used in other countries to improve operational conditions. Thus, the main objective of this dissertation was to analyze the operational conditions and the feasibility of widening interventions of two-lane rural highways, such as i) passing lanes; ii) 2+1 road; iii) duplication. The proposed method had three main steps: i) data collection and treatment; ii) operational analysis by determining the

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

levels of service using the 6th and 7th editions of the HCM. The results obtained with HCM-7 indicated that the passing lanes could promote one level of service improvement, which can last for seven to ten years. Similarly, 2+1 highways can improve operational conditions for 16 years, and highway duplication is not necessary during this period. Segments with level terrain presented results (obtained with HCM-6) that take an average of six years to be equivalent to the results obtained for segments with rolling terrain, which represents an operational advantage. The level of service obtained with HCM-7 was considerably better than applying HCM-6. The difference to achieve the level of service “D” for rolling terrain, between both manuals, was 20 years.

KEYWORDS: CAPACITY. PASSING LANES. 2+1 ROAD. LEVEL OF SERVICE. TWO-LANE RURAL HIGHWAYS.

Introdução

O Brasil possui a maior parte da malha rodoviária federal pavimentada em pista simples, aproximadamente 87%. Mais de 70% da malha viária total das rodovias federais são classificadas como péssima, ruim ou regular (CNT, 2022). Tomando como exemplo o estado de Minas Gerais, Pereira (2018) menciona que o custo estimado para recuperação da malha viária estadual seria de aproximadamente R\$ 2,869 bilhões no ano de 2018; entretanto, neste mesmo ano, o orçamento disponibilizado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER/MG) para este fim foi de R\$ 330 milhões. A disparidade entre os recursos necessários e os disponíveis para melhoria do sistema de transporte exige competência na gestão dos recursos por parte do poder público (Senna, 2014).

Para as situações em que o sistema apresenta condições insatisfatórias, poderá ser analisada a implementação de intervenções relacionadas à melhoria operacional, com base no nível de serviço (ITE, 2016). O *Highway Capacity Manual (HCM)*, cuja última versão (7ª) foi publicada em 2022 (TRB, 2022), fornece métodos para realizar uma análise das condições operacionais para múltiplas configurações de rodovia, sobretudo por meio da determinação dos níveis de serviço. A versão mais recente do HCM (2022) estabelece um novo método para determinação dos níveis de serviço para rodovias de pista simples em relação à edição anterior (6ª), publicada em 2016 (TRB, 2016), sendo, portanto, relevante a análise dos impactos causados nos resultados dos níveis de serviço utilizando a 6ª e 7ª edições do HCM.

A busca de alternativas para melhoria da condição operacional de rodovias de pista simples, com soluções mais atrativas do ponto de vista econômico, é um tema bastante longo. FHWA (1985) e DNER (DNER, 1999) propuseram a implantação de faixas adicionais para rodovia de pista simples, como medidas alternativas à duplicação, adotando o nível de serviço como representativo da condição operacional. Na mesma esteira, TRB (2016) afirma que, quando ocorrem problemas operacionais em rodovias rurais de pista simples, muitos gestores consideram a duplicação como principal alternativa. Entretanto, outro método eficaz para reduzir os problemas operacionais consiste na implantação de faixas de ultrapassagem ou de faixas de subida.

Nesse aspecto, cabe ressaltar que os termos “ampliação de capacidade” (ANTT, 2020) e “adequação de capacidade” (DNIT, 2020) são largamente empregados no setor

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

rodoviário, com destaque para Estudos de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental (EVTEA), além de editais e contratos de concessões rodoviárias. Ambos os termos possuem o mesmo significado, sendo utilizados para indicar intervenções relacionadas à melhoria operacional.

Ainda que o HCM-6 (TRB, 2016) conceitue que a implantação de faixas de ultrapassagem ou de subida não resulta no aumento da capacidade de uma rodovia de pista simples, essas soluções podem melhorar consideravelmente os níveis de serviço, postergando a necessidade da implementação de intervenções de maior porte. No Brasil, os termos ampliação e adequação de capacidade são utilizados para indicar intervenções e promovem a melhoria operacional de uma rodovia, e, por esse motivo, serão mantidos neste artigo, como preconizado por órgãos brasileiros (ANTT, 2007; DNIT, 2006a).

Polus e Pollatschek (2004) mencionam que, dentre as obras de ampliação de capacidade para rodovia de pista simples mais comuns, estão a duplicação, as faixas de ultrapassagens (ou *passing lanes*, inseridas, geralmente, em segmentos de relevo plano ou ondulado) e as faixas adicionais (*climbing lanes*, ou terceiras faixas, em rampas ascendentes). Por outro lado, Bergh *et al.* (2016) incluem a solução representada pela configuração geométrica denominada como rodovia “2+1” – que consiste na adaptação da seção transversal na rodovia incluindo uma faixa de tráfego intermediária que alterna de direção em intervalos de 1 a 3 km – como obra de ampliação de capacidade além das *passing lanes* e *climbing lanes*. Essas soluções podem ser consideradas similares, uma vez que a aplicação depende principalmente do relevo, e, por conta disso, podem ser denominadas apenas como faixa adicional.

Dessa forma, a meta deste trabalho consiste na análise de intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples, tendo sido realizada sob a ótica dos níveis de serviço. Na seção a seguir, são apresentados alguns critérios de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples encontrados na literatura.

Critérios para ampliação de capacidade em rodovias de pista simples

Segundo TRB (2016) e TRB (2022), a capacidade de uma rodovia de pista simples sem faixa adicional, sob condições básicas (largura faixa de tráfego $\geq 3,60$ m; largura acostamento $\geq 1,80$ m; ausência de proibição de ultrapassagem; relevo plano; somente veículos de passeio na corrente de tráfego) é de 1.700 cpe/h em um sentido, com um limite de 3.200 cpe/h para os dois sentidos.

Jain *et al.* (2019) desenvolveram uma pesquisa para estimativa da capacidade de rodovias de pista simples em rampas ascendentes na Índia. Segundo os autores, a maior parte do sistema de transporte rodoviário da Índia é composto por rodovias de pista simples. Os valores obtidos indicaram que a capacidade varia conforme a inclinação da rampa. Para valores de rampa entre 2% e 7%, a capacidade varia de 2.700 a 1.800 cpe/h. Os autores mencionam ainda que esses valores estão próximos dos volumes considerados na China e na Indonésia para a capacidade de rodovias de pista simples em terreno montanhoso, 2.300 cpe/h e 2.900 cpe/h, respectivamente. De forma similar, Brilon e Weiser (2006), após a realização de pesquisas na Alemanha, incluindo a simulação de

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

trechos rodoviários e observações de campo, consideraram a capacidade bidirecional de uma rodovia alemã de pista simples, em relevo plano, igual a 2.500 veic/h.

Dowling *et al.* (2016) apresentam volumes de tráfego representativos para operação em cada um dos níveis de serviço em rodovia de pista simples, utilizando o método estabelecido em TRB (2016). Conforme os resultados apontados pelos autores, para rodovias de classe I do HCM (rodovias em que motoristas esperam viajar em velocidades relativamente altas), a transição do Nível de Serviço (NS) “D” para “E” ocorre próximo do volume horário direcional de 750 veic/h (12.500 veic./dia) em segmentos de relevo plano e 690 veic/h (11.500 veic./dia) para segmentos com relevo ondulado.

Da mesma forma, FDOT (2020) estimou valores de referência para o planejamento do sistema viário relacionando nível de serviço com volume de tráfego para rodovias rurais situadas em regiões em desenvolvimento. Os limites estimados de Volume Médio Diário (VMD) para cada um dos níveis de serviço em rodovias de pista simples, com velocidade de aproximadamente 88 km/h, foram: i) NS B = 4.600 veic/dia; NS C = 8.600 veic/dia; NS D = 14.000 veic/dia; NS E = 28.500 veic/dia. Os volumes estimados para hora de pico foram: i) NS B = 440 veic/h; NS C = 820 veic/h; NS D = 1.330 veic/h; NS E = 2.710 veic/h. Buscando estabelecer um limite para a duplicação de rodovias de pista simples, NDOR (2010) considera passível de duplicação rodovias rurais com VMD superior a 10.000 veic/dia, ao longo de um período de projeto de 20 anos.

Por outro lado, Romana e Hernando (2016) realizaram um estudo para estimativa do volume limite de veículos para implantação de obras de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples na Espanha. Os autores concluíram que a estimativa de 10.000 veic/dia é bastante conservadora para as características encontradas em Madri, apresentando como alternativa para segmentos rurais o volume de 15.000 veic/dia, podendo chegar a 18.000 veic/dia quando a participação de veículos comerciais na composição da frota é reduzida.

Polus e Pollatschek (2004) desenvolveram um critério para ampliação de capacidade de rodovias de pista simples na qual foram analisadas soluções como a duplicação, abordando aspectos sobre a conceituação de faixas de ultrapassagem e terceira faixa, incluindo a análise econômica das alternativas. A pesquisa foi elaborada considerando o desenvolvimento teórico de modelos de atraso e o uso de simulação para verificar o efeito de parâmetros como o volume de tráfego direcional, porcentagem de veículos comerciais e distribuição das velocidades. O atraso acumulado ao longo de toda a vida útil do projeto foi descontado, representando o valor monetário presente. Esse valor foi comparado aos custos de construção de cada alternativa analisada, segundo o relevo do terreno. Os resultados apontaram para indicação de obras de duplicação para rodovias de pista simples com volumes de tráfego diários entre 9 e 12 mil veículos.

Bai *et al.* (2017) buscaram estabelecer limites de volume de tráfego para intervenções de ampliação de capacidade no contexto do gerenciamento de rede, por meio de uma pesquisa exploratória. Nesse trabalho, foram analisadas três situações distintas: (i) a manutenção da geometria existente, em pista simples; (ii) a duplicação da rodovia; e (iii) a implantação de via expressa (controle total de acessos). O método proposto utilizou uma simulação de Monte Carlo para gerar a distribuição de probabilidade da vida útil em cada uma das alternativas. Os resultados indicaram a necessidade de duplicação

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

com volume de tráfego médio diário superior a 12.000 veic/dia e a possibilidade de ampliação da capacidade com volumes superiores a 6.000 veic/dia.

Melo e Setti (2007), no Brasil, utilizaram ferramenta de microsimulação aliada a uma avaliação econômica pela Análise Benefício-Custo (ABC) para a determinação dos fluxos mínimos de veículos para os quais torna viável a implantação de faixa adicional. Os valores foram sugeridos em função do comprimento e da declividade da rampa ascendente, combinado com o percentual de caminhões e de ônibus na composição do tráfego.

Portanto, em relação ao volume de tráfego para duplicação de uma rodovia de pista simples, Polus e Pollatschek (2004) estimaram volumes entre 9 e 12 mil veículos como viáveis, dependendo do relevo da região, enquanto Bai *et al.* (2017) sugerem o volume de 12.000. Ambos os autores estão próximos do volume de 10.000 veículos/dia determinado por NDOR (2010). Segundo Dowling *et al.* (2016), esses volumes estariam próximos do limite superior do nível de serviço D, ou seja, próximos da transição do NS “D” para o NS “E”.

Highway Capacity Manual (HCM)

O *Highway Capacity Manual* é uma das principais referências mundiais para a análise do nível de serviço e da capacidade de diversos elementos do sistema viário, com as rodovias de pista simples. Em 2022, foi publicada a 7ª edição do HCM (TRB, 2022), promovendo um novo método para determinação dos níveis de serviço em rodovias de pista simples, com diferenças significativas em relação à edição anterior (HCM, 2016).

Embora diversos autores tenham estudado adaptações de versões do HCM para as rodovias nacionais, tais como Oliveira e Bessa Jr. (2022), Silva (2019), Bessa Jr. e Setti (2018), Pereira e Bessa Jr. (2017), Bessa Jr. (2015), Mon-Ma (2008) e Utimura *et al.* (2007), mencionando, em síntese, que a utilização do HCM sem adaptação tende a subestimar os níveis de serviço, no presente trabalho optou-se pela utilização dos métodos propostos no HCM sem nenhuma adaptação, tendo em vista a frequente preconização do manual por órgão brasileiros sem nenhuma modificação nos métodos. Adiante serão abordadas as principais etapas para a determinação dos níveis de serviço para cada uma das edições do manual (HCM-6 e HCM-7), com um breve comparativo dos métodos voltados para avaliação de rodovias de pista simples.

HCM-6

Para a determinação do nível de serviço de rodovias de pista simples, o HCM-6 adota três medidas de desempenho, que são usadas conforme a classe da rodovia. Essas medidas de serviço são:

- Velocidade Média de Viagem (ATS): reflete a mobilidade em uma rodovia de pista simples, representando a velocidade média no espaço obtida no segmento;
- Porcentagem de Tempo Viajando em Pelotões (PTSF): representa a liberdade de manobras e o conforto e a conveniência da viagem. A PTSF constitui no percentual

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

médio de tempo que os veículos viajam em pelotões, atrás de veículos mais lentos, devido a impossibilidade de ultrapassagem;

- Porcentagem da Velocidade de Fluxo Livre (*PFFS*): representa o quão próximo da velocidade regulamentar os veículos são capazes de viajar.

Ainda segundo o HCM-6, as rodovias de pista simples podem ser caracterizadas em três classes:

- Classe I: são rodovias em que os motoristas esperam viajar em velocidades relativamente altas. São normalmente empregadas em ligações entre municípios e utilizadas como rotas regulares, diariamente. Esse tipo de rodovia é utilizado principalmente em viagens de longas distâncias, ou fornecem conexão entre vias que serão utilizadas para viagens de longas distâncias.
- Classe II: são rodovias em que o motorista não necessariamente espera viajar em altas velocidades. Funcionam como rotas de acesso para rodovias de Classe I, servindo como rotas turísticas ou recreativas, ou passando por terreno montanhoso. Esse tipo de rodovia geralmente é utilizado por viagens relativamente curtas, nas porções iniciais ou finais de viagens de longas distâncias.
- Classe III: são rodovias que servem áreas moderadamente desenvolvidas. Elas podem representar segmentos de rodovias de Classes I ou II que passam por pequenas cidades ou áreas recreativas desenvolvidas. O tráfego local geralmente se mistura como o tráfego de longa distância. Esse tipo de rodovia comumente apresenta velocidade regulamentada menor do que em rodovias de classes diferentes.

Os critérios para a determinação do nível de serviço das rodovias de Classe I e II, que são as que não passam por áreas urbanizadas, estão na Tabela 1. O critério voltado para Classe I pode ser ilustrado também pela Figura 1.

Tabela 1. Critérios para determinação do NS em rodovias de pista simples de classe I e II, segundo o HCM-6 (TRB, 2016)

Rodovias de classe I			Rodovias de classe II	
NS	<i>PTSF</i> (%)	<i>ATS</i> (km/h)	NS	<i>PTSF</i> (%)
A	≤ 35	> 90	A	≤ 40
B	> 35-50	> 80-90	B	> 40-55
C	> 50-65	> 70-80	C	> 55-70
D	> 65-80	> 60-70	D	> 70-85
E	> 80	≤ 60	E	> 85

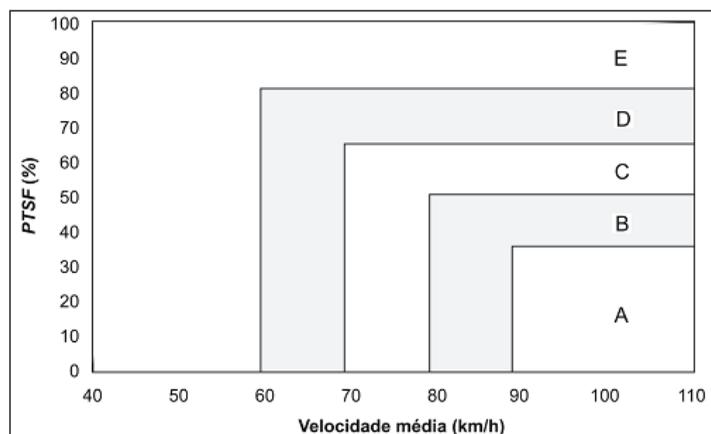


Figura 1. Critério para determinação do NS em rodovias de pista simples de classe I.

As equações 1 e 2 devem ser usadas para determinar, para um sentido de análise, a velocidade média de viagem (ATS_d) e a porcentagem de tempo viajando em pelotões ($PTSF_d$):

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

Em que:

ATS_d : velocidade média de viagem para a direção analisada (km/h);

FFS : velocidade de fluxo livre (km/h);

$f_{np,ATS}$: fator de ajuste em razão da presença de zonas de ultrapassagens proibidas para estimar ATS_d ;

v_d : fluxo de tráfego na direção analisada (cpe/h); e

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

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \cdot \left(\frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right) \quad (2)$$

Em que:

$BPTSF_d$: $PTSF$ direcional em condições básicas;

$f_{np,PTSF}$: fator de ajuste para zonas com ultrapassagens proibidas para estimar $PTSF_d$;

$v_{d,PTSF}$: fluxo de tráfego direcional para estimação da $PTSF_d$ (cpe/h); e,

$v_{o,PTSF}$: fluxo de tráfego na direção oposta para estimação da $PTSF_d$ (cpe/h).

A análise operacional do nível de serviço em segmentos com faixas adicionais é desenvolvida com um método diferente para estimação das medidas de serviço ATS_d e $PTSF_d$, uma vez que elas sofrem uma influência positiva em função da presença das faixas. No caso das faixas adicionais de subida, elas são normalmente indicadas quando atingidos os seguintes parâmetros (TRB, 2016; AASHTO 2018):

1. A taxa de fluxo direcional na rampa de subida excede 200 veic/h;
2. A taxa de fluxo direcional de caminhões na rampa de subida excede 20 veic/h; e

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

3. Qualquer uma das três condições abaixo:

- a. Há uma redução de velocidade de 16 km/h ou mais na velocidade dos caminhões típicos;
- b. A rampa opera nos níveis de serviço E ou F; ou
- c. O nível de serviço na rampa é dois ou mais níveis inferiores ao nível de serviço no segmento adjacente (a montante).

Por sua vez, o método para determinação dos níveis de serviço em rodovia de pista dupla na 6ª edição do HCM (TRB, 2016) sofreu apenas duas modificações na 7ª edição (TRB, 2022): i) a retirada do fator de familiaridade dos motoristas com a rodovia (f_p) na determinação do fluxo de tráfego (v_p); ii) a retirada da proporção de veículos recreacionais na corrente de tráfego (PR) e equivalente veicular para os veículos recreacionais (ER) na determinação do fator de ajuste para veículos pesados (f_{HV}). A medida de desempenho usada para estimar o nível de serviço nesse tipo de rodovia é a densidade, conforme ilustrado pela seguinte equação:

$$D = \frac{v_p}{S} \quad (3)$$

Em que:

- D : densidade (veic/km/faixa);
- v_p : fluxo de tráfego (veic/h/faixa); e
- S : velocidade média de viagem dos automóveis (km/h).

HCM-7

A determinação dos níveis de serviço para as rodovias de pista simples no HCM-7 (TRB, 2022) baseou-se na publicação de Washburn *et al.* (2018), adotando uma nova medida de desempenho para o cálculo dos níveis de serviço, a densidade de veículos em pelotões, ou *Follower Density* (FD).

No HCM-7, não há a classificação do segmento homogêneo entre rodovias de classe I, II, e III, apenas diferenciação entre rodovias de alta velocidade ou baixa velocidade para definição do critério de determinação do nível de serviço com base na FD , conforme a seguinte descrição:

- Rodovias de alta velocidade: possuem velocidade regulamentar maior ou igual a 50 mi/h (80,46 km/h), em que a velocidade e o atraso devido às restrições de ultrapassagem são importantes para os motoristas. As rodovias de pista simples de maior velocidade são aquelas que promovem ligação entre cidades; e
- Rodovias de baixa velocidade: a velocidade regulamentada é menor que 50 mi/h (80,46 km/h) e são tipicamente encontradas em rotas turísticas e rurais desenvolvidas. Essas rodovias geralmente têm limites de velocidade de 35-45 mi/h (56,32 a 72,42 km/h) e têm oportunidades limitadas de ultrapassagem.

A Tabela 2 apresenta os critérios para determinação do nível de serviço baseado na FD .

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

Tabela 2. Critérios para determinação do nível de serviço com base na *FD* (TRB, 2022)

Nível de Serviço	<i>Follower Density (FD)</i>			
	Rodovias de alta velocidade		Rodovias de baixa velocidade	
	Velocidade Regulamentada ≥ 80 mi/h (veic/mi/faixa)	Velocidade Regulamentada $\geq 80,46$ km/h (veic/km/faixa)	Velocidade Regulamentada < 80 mi/h (veic/mi/faixa)	Velocidade Regulamentada $< 80,46$ km/h (veic/km/faixa)
A	$\leq 2,0$	$\leq 3,21$	$\leq 2,5$	$\leq 4,02$
B	$> 2,0 - 4,0$	$> 3,22 - 6,44$	$> 2,5 - 5,0$	$> 4,02 - 8,05$
C	$> 4,0 - 8,0$	$> 6,44 - 12,87$	$> 5,0 - 10,0$	$> 8,05 - 16,09$
D	$> 8,0 - 12,0$	$> 12,87 - 19,31$	$> 10,0 - 15,0$	$> 16,09 - 24,14$
E	$> 12,0$	$> 19,31$	> 15	$> 24,14$

Da Tabela 2, é possível observar duas classes para a determinação dos níveis de serviço, separadas pela velocidade de 50 mi/h (80,46 km/h). Ocorre que grande parte das rodovias de pista simples possui a velocidade regulamentar de 80 km/h, podendo haver dúvidas sobre a classe a ser considerada pelo projetista. Dessa forma, optou-se por avaliar o impacto dessas duas classes nos resultados dos níveis de serviço. Embora ambas as classes de rodovia apresentadas na Tabela 2 possuam faixas de densidade similares, essas rodovias de baixa velocidade aceitam valores maiores de *FD* pela expectativa dos motoristas de não desenvolverem altas velocidades.

A primeira etapa do método preconizado pelo HCM-7 corresponde à segmentação do trecho objeto de estudo, de acordo com os tipos de segmentos: i) com restrição de ultrapassagem; ii) sem restrição de ultrapassagem; ou iii) com faixas adicionais. Sendo assim, a classificação dos segmentos passa a levar em consideração a Linha de Divisão de Fluxos Opostos (LFO). Essa proposta resulta em um número de segmentos homogêneos consideravelmente maior com a aplicação do HCM-7 se comparado ao método preconizado pelo HCM-6, tendo em vista que a LFO é alterada de forma muito mais frequente ao longo do segmento de uma rodovia com relevo homogêneo.

Os dados de entrada para cálculo dos níveis de serviço também foram modificados. O volume do sentido de análise é determinado sem a influência do fator de ajuste para veículos pesados, como ocorria no HCM-6, sendo dado em veic/h. Parâmetros como a porcentagem de zonas de ultrapassagens proibidas não são mais necessários.

Cada subsegmento também precisa ser classificado em função do relevo. Para trechos em tangente, cada uma das curvas verticais é recebe uma classificação de 1 a 5, sendo a última para relevos mais acidentados. A mesma classificação também precisa ser realizada para trechos com curvas horizontais, determinada em função do raio e da superelevação do segmento.

Dessa forma, para cada subsegmento, a *FD* é calculada pela equação 4, combinado os valores de três medidas de desempenho, a velocidade média de viagem e a porcentagem de veículos em pelotões – que são estimadas de acordo com o método presente no HCM-7 – e o fluxo de veículos que trafegam no sentido analisado, obtido em campo.

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
 J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

$$FD = \frac{PF}{100} \times \frac{V_d}{ATS} \quad (4)$$

Em que:

- *FD*: Densidade de veículos em pelotões;
- *PF*: Porcentagem de veículos em pelotões;
- *vd*: Fluxo de tráfego no sentido analisado (veic/h); e
- *ATS*: Velocidade média de viagem (km/h).

Segundo o HCM-7, o nível de serviço dos segmentos com faixa adicional é determinado calculando o desempenho no ponto médio do trecho que possui a faixa adicional, sendo esta medida representativa para todo o segmento homogêneo com faixa adicional. Caso o segmento analisado esteja situado na área de abrangência do comprimento efetivo da faixa adicional, deverá ser calculado um ajuste representativo da melhoria de desempenho neste local.

Método proposto

O método proposto para elaboração deste trabalho é composto por três etapas, conforme apresentado na Figura 2. A primeira delas consiste na coleta e tratamento dos dados, incluindo o processamento das informações relacionadas à demanda e infraestrutura (geometria). A segunda etapa aborda questões relacionadas à análise operacional, incluindo a definição dos cenários e segmentos objeto de estudo para determinação dos níveis de serviço, utilizando o HCM-6 e HCM-7 para avaliação das intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples. A terceira etapa consiste nas considerações sobre os níveis de serviço das intervenções de ampliação de capacidade para rodovias de pista simples.

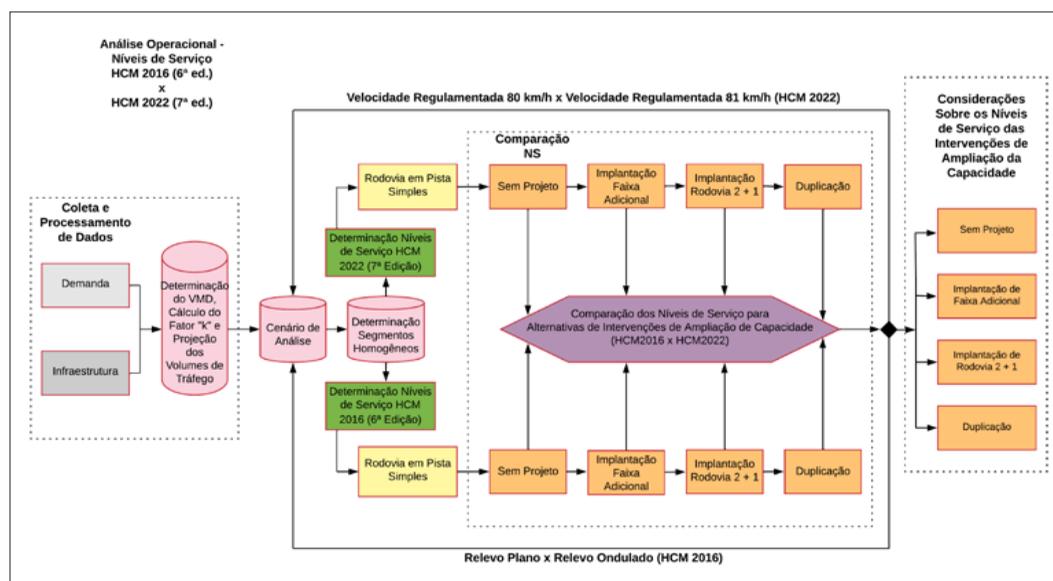


Figura 2. Método proposto.

Coleta e processamento de dados

Para o desenvolvimento deste estudo, foram coletados dados e informações de um trecho experimental, em pista simples, com aproximadamente 48,37 km de extensão, utilizado para aplicação do método proposto. O trecho experimental possui uma praça de pedágio PP-05, situada no município de Jangada, no km 398,00 da BR-163/MT, utilizada para a caracterização da demanda ao longo de toda a sua extensão.

As informações de infraestrutura (geometria) foram fornecidas pela concessionária Rota do Oeste, que gerencia a rodovia, obtidas por meio da realização de levantamento topográfico planialtimétrico, a partir de perfilamento a laser e fotogrametria digital, na escala de 1:1.000, PEC classe A, em área de aproximadamente 21 km². Os dados de demanda foram obtidos junto aos dados abertos da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Os volumes de tráfego, assim como as demais informações consideradas para o desenvolvimento deste trabalho, são do ano de 2019, ou seja, antes do início da pandemia de COVID-19 no Brasil. Posteriormente, os volumes foram projetados para o ano de 2022, considerado como ano 0 do horizonte de projeto, resultando em um VMD de 6.352 veic./dia.

Para a determinação do fator horário de projeto K, os volumes de tráfego foram compilados utilizando o período de agregação de uma hora, para aplicação do método de análise da curva da enésima hora, resultando no fator K igual 0,091 para o sentido Norte e 0,084 para o Sentido Sul, ambos considerando o critério da 50^a hora de projeto (ANTT, 2007; ANTT, 2017; DER, 2018). Em seguida, foi determinado o volume horário de análise para ambos os sentidos de tráfego, de 322 veic/h para o sentido norte e 304 veic/h para o sentido sul, no ano de 2022. Para a projeção dos volumes de tráfego, utilizou-se a taxa de crescimento média geométrica de 3% ao ano (DNIT, 2006b) ao longo de todo o período de projeto, definido como 50 anos (2072).

Análise operacional das intervenções de ampliação de capacidade

A primeira etapa da análise operacional consiste na determinação dos cenários de intervenções de ampliação de capacidade, considerando os métodos do HCM-6 e HCM-7. Foram avaliadas quatro situações distintas: i) sem projeto; ii) com faixas adicionais; iii) com implantação de rodovia 2+1; iv) com duplicação.

A definição entre o relevo plano e ondulado no HCM-6 é uma etapa controversa, pois não há uma forma objetiva de definir esses relevos em campo, embora o manual apresente uma descrição desses relevos no método. Sendo assim, optou-se por determinar os níveis de serviço para o HCM-6 em um cenário considerando o relevo plano e em outro cenário considerando o relevo ondulado para o trecho experimental.

Da mesma forma, no HCM-7, a definição entre a classe da rodovia para o cálculo da *Follower Density* (FD) é determinada com base na velocidade de 50 mi/h (80,46 km/h). Portanto, embora, por definição, o trecho experimental esteja mais aderente com as rodovias de alta velocidade (≥ 50 mi/h), uma vez que possui a velocidade regulamentada de 80 km/h, optou-se por determinar os níveis de serviço para o HCM-7 em um

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

cenário considerando a velocidade regulamentar exatamente igual a 80 km/h (49,7 mi/h) – o que representaria uma rodovia de baixa velocidade, segundo o HCM-7 – e outro cenário considerando a velocidade regulamentar de 81 km/h (50,3 mi/h) – o que culmina numa rodovia de alta velocidade, segundo o mesmo manual. Dessa maneira, foi possível verificar o impacto de cada uma dessas opções na análise. A Tabela 3 ilustra os cenários de análise considerados neste estudo.

Tabela 3. Cenários de análise

Cenário	Intervenção	Versão HCM	Observação
1	sem projeto		
2	faixa adicional	HCM-7	velocidade regulamentar de 80 km/h
3	rodovia 2+1		
4	duplicação		
5	sem projeto		
6	faixa adicional	HCM-7	velocidade regulamentar de 81 km/h
7	rodovia 2+1		
8	duplicação		
9	sem projeto		
10	faixa adicional	HCM-6	relevo plano
11	rodovia 2+1		
12	duplicação		
13	sem projeto		
14	faixa adicional	HCM-6	relevo ondulado
15	rodovia 2+1		
16	duplicação		

A demanda de tráfego é a mesma para todos os cenários de análise, tendo em vista que não foi considerada uma eventual parcela de tráfego gerado em função das melhorias agregadas ao sistema. Para efeito de comparação entre os cenários, embora a segmentação homogênea seja diferente para ambos os métodos, optou-se por compatibilizar a segmentação do HCM-6 com o HCM-7, possibilitando o posicionamento das faixas adicionais nos mesmos locais, de acordo com os critérios do HCM-7, que possui uma segmentação mais detalhada.

Cada cenário possui apenas um tipo de obra de ampliação de capacidade, ou seja, não foram combinadas soluções como faixa adicional e duplicação em um mesmo cenário, simplificando o processo de análise dos resultados. O critério empregado para indicação das obras de ampliação de capacidade considerou a operação aceitável até a 50^a hora no NS “E” (TCU, 2016), ou seja, sempre que ocorre a operação no nível de serviço “E” na 50^a hora, uma obra de ampliação de capacidade é indicada, seja a implantação de faixa adicional ou a duplicação. Considerou-se que as intervenções são implantadas apenas uma vez em cada cenário, ou seja, após a implantação de rodovia 2+1 em determinado ano, quando o nível de serviço E for atingido na 50^a hora, a rodovia será duplicada.

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

As obras de ampliação de capacidade foram indicadas nos locais que apresentaram o pior nível de serviço na condição sem projeto, observando o espaçamento mínimo entre faixas adicionais existentes, considerado como 3 km, que é a menor distância recomendada por Austroads (2021). Foi considerada a extensão máxima das faixas adicionais igual 1,60 km, maior distância recomendada por AAHSTO (2018) para fluxos direcionais entre 400 e 700 veic/h.

Para a rodovia 2+1, considerou-se a implantação das faixas adicionais com aproximadamente 1,5 km, uma vez que Gattis *et al.* (2006) constataram maiores benefícios ao longo dos primeiros 1,5 km das faixas adicionais. O valor adotado está próximo da extensão de 1,60 km determinada em AAHSTO (2018). Essas premissas – que são o menor espaçamento e a maior extensão das faixas adicionais para implantação de rodovias 2+1 – foram adotadas tendo em vista a participação do tráfego comercial de aproximadamente 75% no trecho experimental. Todos os estudos, citados anteriormente, relacionados com espaçamento ou comprimento das faixas adicionais, foram desenvolvidos com a participação do tráfego comercial inferior a 40%.

Os níveis de serviços foram determinados utilizando a versão mais recente do *Highway Capacity Software - HCS* (McTrans, 2023). O HCS possui módulos específicos com rotinas que realizam o cálculo dos níveis de serviço segundo os métodos propostos no HCM-6 e HCM-7. Portanto, a indicação das obras de ampliação de capacidade foi realizada de forma individual, para cada segmento do trecho experimental, buscando estabelecer um padrão para facilitar a comparação dos resultados obtidos.

De posse desses resultados, foi possível a determinação do tempo de duração entre cada uma das intervenções de ampliação de capacidade, até o atingimento do nível de serviço “E”. Para isso, foram tomadas como base as características do trecho experimental, assim como a avaliação do impacto da utilização do HCM-7 para determinação dos níveis de serviço de rodovias de pista simples, comparando-o com os resultados obtidos por meio do HCM-6.

Trecho experimental

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram coletados dados e informações de um trecho experimental com aproximadamente 48,37 km da Rodovia BR-163, compreendido entre o km 358,52 (em Várzea Grande, no estado brasileiro do Mato Grosso, MT) e o km 406,89 (em Jangada, também no estado de Mato Grosso, MT). O trecho está sob concessão da Rota do Oeste, sua localização pode ser vista na Figura 3. Em relação às informações sobre a infraestrutura, foram necessários dados de entrada específicos, tais como a inclinação de cada rampa vertical, o raio e a superelevação de cada curva horizontal, as zonas de ultrapassagens proibidas e permitidas e a localização de faixas adicionais.

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

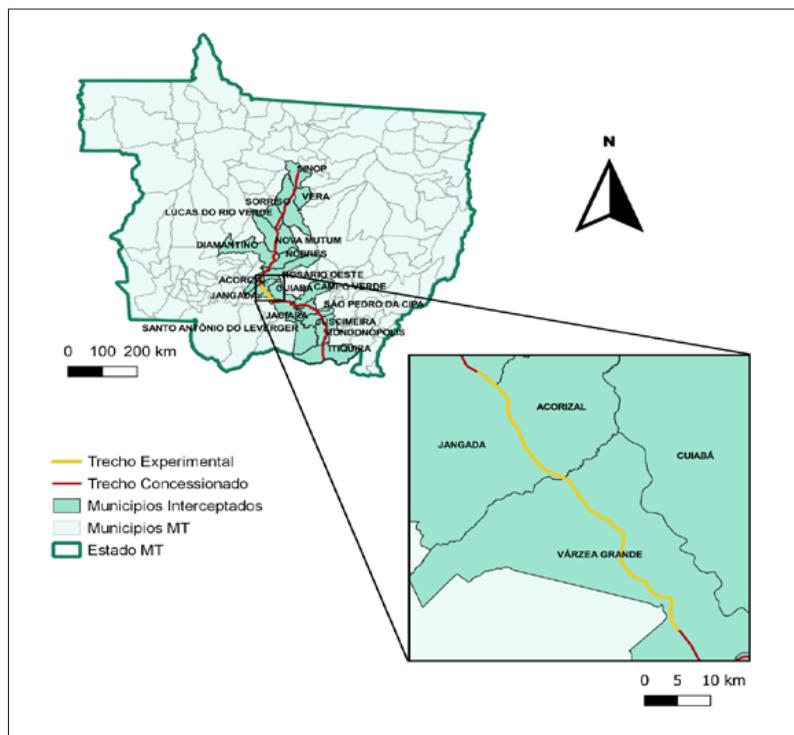


Figura 3. Trecho experimental.

Análise do nível de serviço

O nível de serviço para os cenários 1 a 8, citados na seção anterior, foram obtidos, para o trecho experimental, utilizando o HCM-7, enquanto o nível de serviço para os cenários 9 a 16 foram obtidos considerando o HCM-6. Os cenários 1 a 4 se referem às rodovias com velocidade regulamentar inferior a 50 mi/h, enquanto os cenários 5 a 8 se referem às rodovias com velocidade regulamentada igual ou superior a 50 mi/h. Como a intervenção prevista para os cenários 4 e 8 se refere à duplicação, e como não houve atualização significativa entre o método do HCM-7 em relação ao HCM-6 para análise de rodovias de pista dupla, os cenários 4 e 8 foram desconsiderados da análise.

As faixas adicionais foram posicionadas adotando a mesma disposição para os cenários 2, 6, 10 e 14. Ao todo, foram consideradas a implantação de sete faixas adicionais, totalizando 10,83 km, aproximadamente 22% da extensão total do trecho experimental, sendo 4,62 km (9,55%) no sentido norte e 6,21 km (12,48%) no sentido sul, conforme apresentado na Tabela 4. O trecho experimental na condição sem projeto já continha 8,61 km de faixas adicionais (aproximadamente 18% da extensão total), sendo 3,15 km (6,51%) no sentido norte e 5,46 km (11,9%) no sentido sul. A extensão projetada de faixas adicionais levou em consideração a disposição das faixas adicionais existentes e o espaçamento mínimo de 3 km entre faixas adicionais, sendo a configuração proposta na Tabela 4 a que apresentou o melhor desempenho para o trecho experimental.

Da mesma forma, com relação à implantação da rodovia 2+1, as faixas adicionais foram posicionadas adotando a mesma disposição para os cenários 3, 7, 11 e 15, considerando a implantação de 21 faixas adicionais. Sendo assim, foram posicionados 30,65 km de

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...

J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

faixas adicionais, o que corresponde, aproximadamente, a 64% da extensão total do trecho experimental. Desse total, 16,03 km (33,14% do trecho experimental) foram localizados no sentido norte e 14,62 km (30,23%) no sentido sul, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 4. Relação das faixas adicionais projetadas no trecho experimental

Nº	Início (km)	Final (km)	Extensão (km)	Sentido
1	359,230	360,750	1,52	Norte (Crescente)
2	370,610	371,770	1,16	Sul (Decrescente)
3	375,650	377,410	1,76	Sul (Decrescente)
4	377,410	379,000	1,59	Norte (Crescente)
5	398,680	400,160	1,48	Sul (Decrescente)
6	400,160	401,67	1,51	Norte (Crescente)
7	404,260	406070	1,810	Sul (Decrescente)

Tabela 5. Relação das faixas adicionais projetadas para rodovia 2+1 no trecho experimental

Nº	Início (km)	Final (km)	Extensão (km)	Sentido
1	359,230	360,750	1,52	Norte (Crescente)
2	360,750	362,300	1,55	Sul (Decrescente)
3	362,300	363,710	1,41	Norte (Crescente)
4	363,710	365,350	1,64	Sul (Decrescente)
5	365,350	366,94	1,59	Norte (Crescente)
6	366,94	368,400	1,46	Sul (Decrescente)
7	368,400	370,040	1,42	Norte (Crescente)
8	370,610	371,770	1,16	Sul (Decrescente)
9	371,770	371,960	1,40	Norte (Crescente)
10	373,170	374,550	1,38	Sul (Decrescente)
11	374,550	375,550	1,10	Norte (Crescente)
12	375,650	377,410	1,76	Sul (Decrescente)
13	377,410	379,000	1,59	Norte (Crescente)
14	382,500	384,070	1,57	Norte (Crescente)
15	398,67	390,85	0,980	Sul (Decrescente)
16	390,85	392,380	1,530	Norte (Crescente)
17	398,680	400,160	1,48	Sul (Decrescente)
18	400,160	401,670	1,51	Norte (Crescente)
19	401,670	402,870	1,20	Sul (Decrescente)
20	402,870	404,260	1,39	Norte (Crescente)
21	404,260	406070	1,810	Sul (Decrescente)

Resultados obtidos com o HCM-7

Os primeiros resultados acerca dos níveis de serviço, obtidos com o método do HCM-7, podem ser vistos na Figura 4. Foi considerada a velocidade regulamentar inferior a 50 mi/h (cenário 1) e o mesmo trecho com velocidade regulamentar igual ou superior a 50 mi/h. Nessa figura, é possível observar a evolução do nível de serviço, anualmente, em cada cenário, por sentido de tráfego (norte e sul). Para cada sentido, foi verificado que os níveis de serviço são atingidos primeiro quando a velocidade regulamentar considerada foi igual ou superior a 50 mi/h, com uma diferença de 5 anos em relação ao cenário considerando a velocidade regulamentar menor do que 50 mi/h.

A Figura 5, por sua vez, ilustra os níveis de serviço encontrados para os cenários 1, 2 e 3 e para os cenários 5, 6 e 7. Foi possível constatar que a implantação das faixas adicionais (cenários 2 e 6), em relação aos cenários 1 e 5 (sem projeto), melhoram em um grau o nível de serviço no ano inicial (ano zero), e adiam de 7 a 10 anos o atingimento do mesmo nível de serviço na condição sem projeto. A rodovia 2+1 melhora os níveis de serviço em um grau para o ano inicial e até dois graus a depender do ano, demorando até 16 anos para atingir a mesma condição operacional antes de sua implantação.

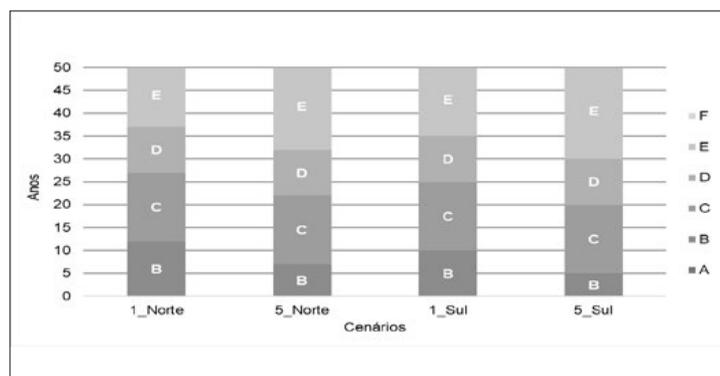


Figura 4. Evolução anual dos níveis de serviço obtidos nos cenários 1 e 5.

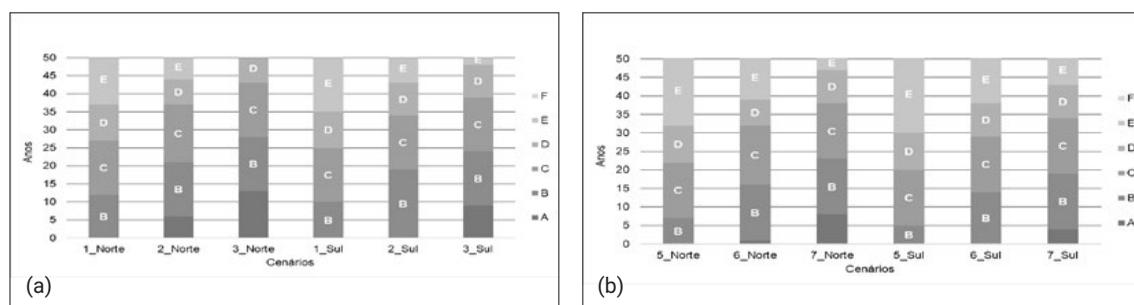


Figura 5. Evolução anual dos níveis de serviço obtidos nos cenários 1, 2 e 3 (a) e nos cenários 5, 6 e 7 (b).

A Figura 6 apresenta os níveis de serviço obtidos em cada ano em relação ao VMD, para os cenários 1, 2, 3, 5, 6 e 7. É possível notar uma variação significativa dos níveis de serviço em função do tipo da intervenção de ampliação da capacidade. Quando as faixas adicionais são incluídas (Figuras 6b e 6e), em relação aos cenários sem projeto

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

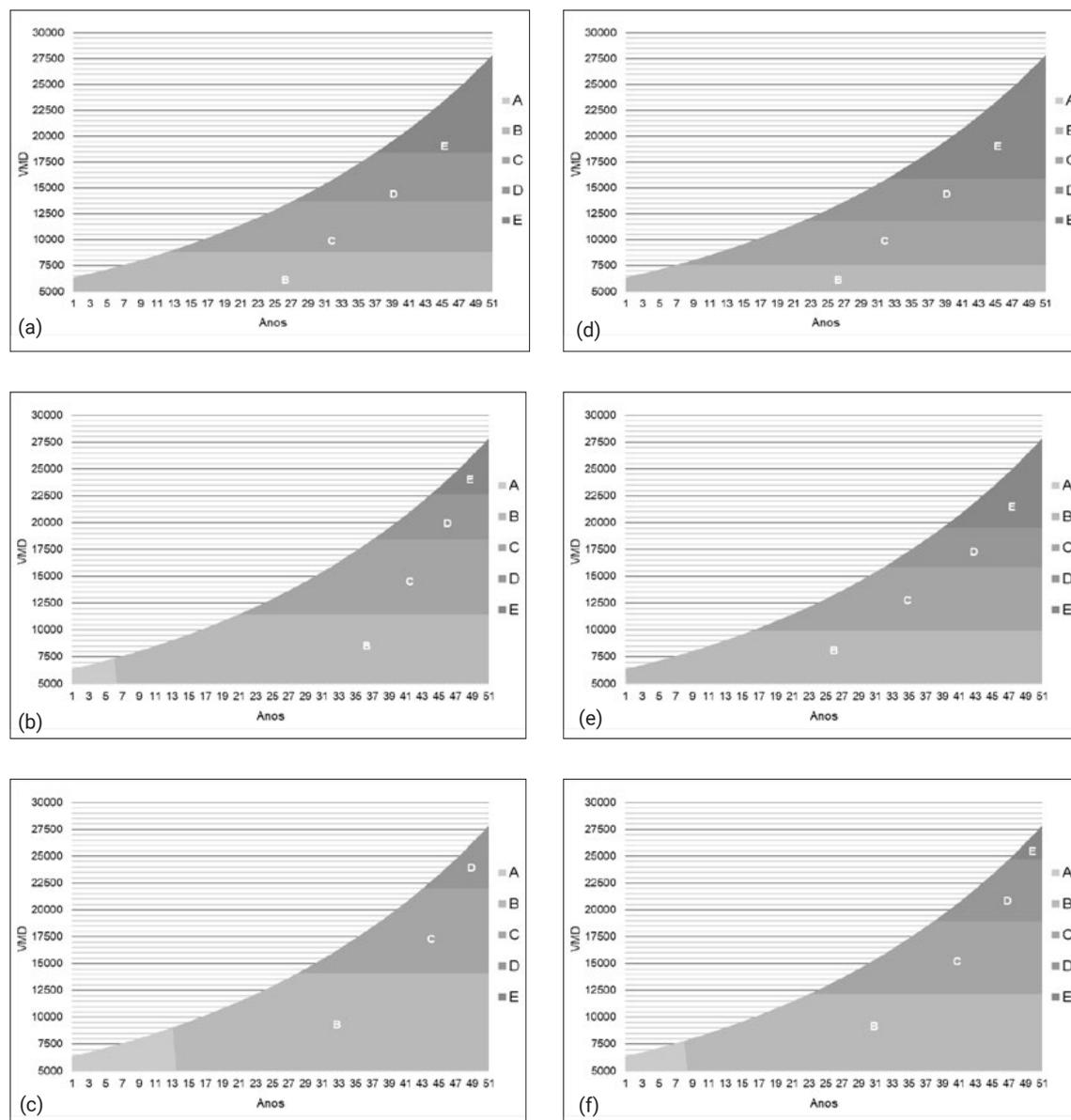


Figura 6. Níveis de serviço obtidos nos cenários 1 (a), 2 (b) e 3 (c) e nos cenários 5 (d), 6 (e) e 7 (f), em função do ano e do VMD.

(Figuras 6a e 6d), as diferenças entre os VMDs de transição dos níveis de serviço foram, em geral, maiores para os cenários com velocidade regulamentar inferior a 50 mi/h. Com a inclusão das faixas adicionais, os VMDs de transição aumentaram, em relação ao cenário sem projeto, em até próximo de 5.000 veic/dia quando a velocidade regulamentar considerada foi menor que 50 mi/h. Quando a velocidade regulamentar considerada foi maior ou igual a 50 mi/h, esse acréscimo de VMD nas transições dos níveis de serviço, em relação ao cenário base, aumentou em até cerca de 4.000 veic/dia.

Da mesma forma, quando a rodovia 2+1 foi considerada, os aumentos dos VMDs nas transições dos níveis foram ainda maiores, em relação aos cenários base. Quando a velocidade

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
 J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

regulamentar considerada foi menor que 50 mi/h (Figuras 6a e 6c), os VMDs de transição foram maiores para os cenários com a intervenção em até próximo de 8.000 veic/dia. Quando a velocidade regulamentar considerada foi maior ou igual a 50 mi/h (Figuras 6d e 6h), a instalação da rodovia 2+1 proporcionou um acréscimo de VMD nas transições dos níveis de serviço em até próximo de 8.500 veic/dia, em relação ao cenário base.

Resultados obtidos com o HCM-6

A Figura 7 apresenta o resultado da comparação dos níveis de serviço considerando o relevo como plano (cenário 9) e ondulado (cenário 13). Foi observada uma diferença de 6 anos na transição dos níveis de serviço nos primeiros anos de análise. Ao longo do período de projeto, essa diferença reduz para um ou dois anos. Apesar de importante, o aspecto do relevo foi menos impactante para os anos de transição dos níveis de serviço, considerando o HCM-6, do que a velocidade regulamentar adotada para aplicação do HCM-7.

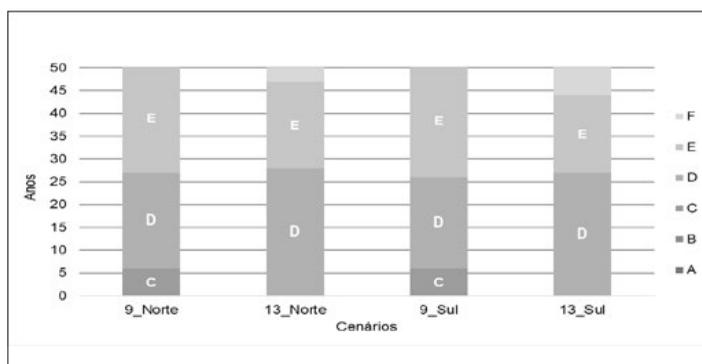


Figura 7. Evolução anual dos níveis de serviço obtidos nos cenários 9 e 13.

A Figura 8 apresenta a comparação dos níveis de serviço entre os cenários 9 a 12 (Figuras 8a a 8d) e os cenários 13 a 16 (Figuras 8e a 8h). Foi possível constatar que a inclusão das faixas adicionais (cenários 10 e 14), se comparada ao cenário 9 e 13 (sem projeto), melhoram em um grau o nível de serviço, adiando por 10 anos o atingimento do mesmo nível de serviço na condição sem projeto. Com a implantação da rodovia 2+1, há uma melhora nos níveis de serviço em 1 ou 2 graus, demorando, em média, 20 anos para atingir a mesma condição operacional antes de sua implantação.

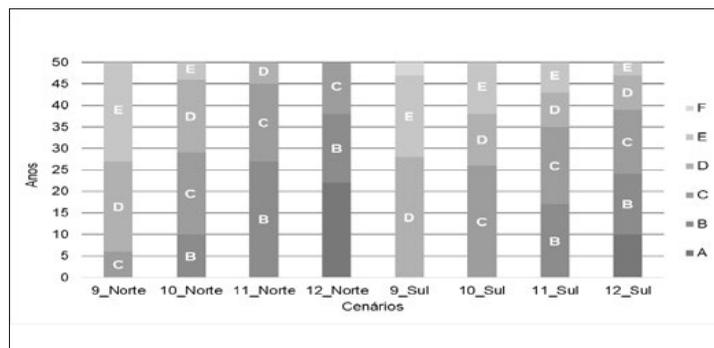


Figura 8. Evolução anual dos níveis de serviço obtidos nos cenários 9 a 12 (a) e os cenários 13 a 16 (b).

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

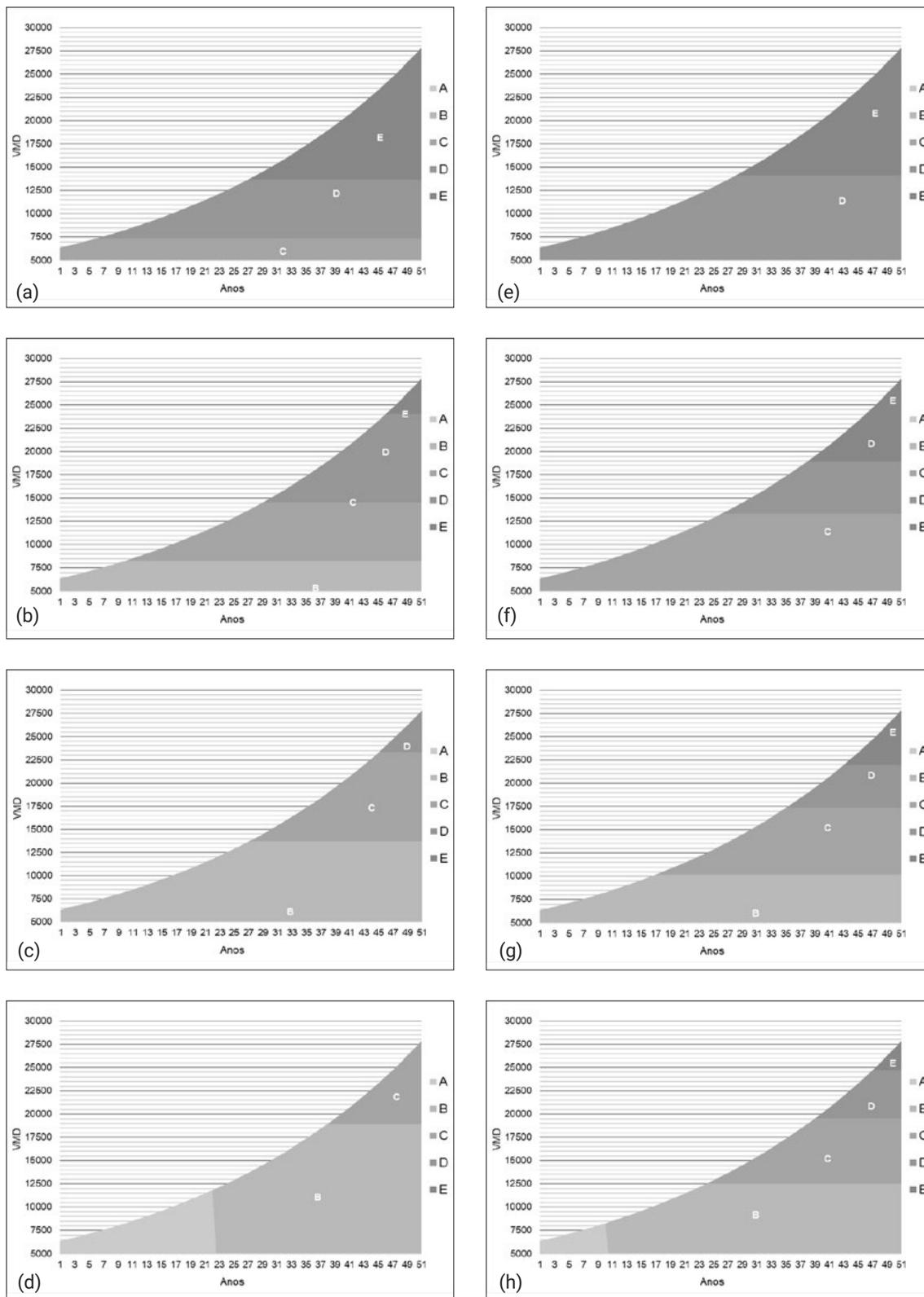


Figura 9. Evolução dos níveis de serviço obtidos para o sentido norte nos cenários 9 (a), 10 (b), 11 (c), 12 (d), 13 (e), 14 (f), 15 (g) e 16(h), em função do ano e do VMD.

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

A Figura 9 apresenta os VMDs nas transições dos níveis de serviço para os cenários 9 a 16. É possível notar uma variação significativa dos valores em função do tipo da intervenção de ampliação da capacidade. Quando o relevo foi considerado plano, os VMDs de transição chegaram a ser, em relação ao cenário base (Figura 9a), de até 16.000 veic/dia para o caso da rodovia 2+1 e com a duplicação chegando, no máximo, em nível C (Figuras 9b a 9d). Quando o relevo foi considerado ondulado, as diferenças foram, em geral, menores, mas ainda bastante elevadas. Tomando como base a transição dos níveis de serviço de D para E, em relação ao cenário sem projeto (Figura 9e), os VMDs nas transições dos níveis de serviço chegaram a ser de até 11.000 veic/dia para o caso da duplicação (Figuras 9f a 9h); o cenário sem projeto atingiu, no máximo, um nível de serviço igual a D.

HCM-7 versus HCM-6

Em relação aos resultados dos níveis de serviço com as duas versões do manual – e tomando como base os cenários 5 e 13, para efeitos de comparação – foi possível observar uma diferença de até dois graus do nível de serviço para melhor no HCM-7 se em relação ao HCM-6, conforme ilustrado na Figura 10 para o ano zero (mas não somente). A diferença de atingimento do nível de serviço “D” entre ambos os manuais é de 20 anos, ou seja, o nível de serviço calculado determinado com o HCM-7 passa a ser o mesmo nível de serviço determinado utilizando o HCM-6 próximo do 20^o ano de projeto.

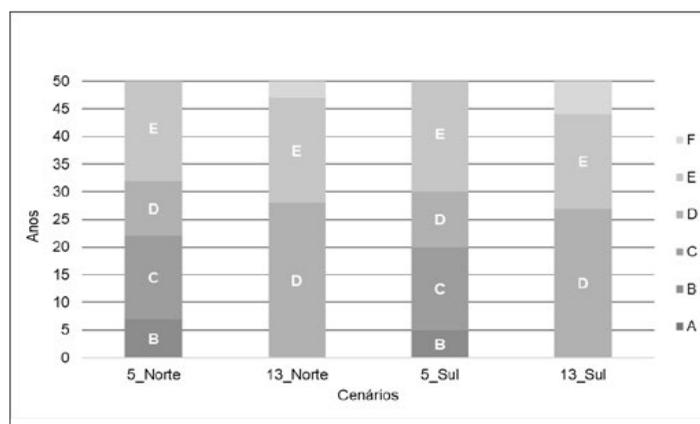


Figura 10. Evolução anual dos níveis de serviço obtidos para os cenários 5 (HCM-7 e velocidade regulamentar igual ou superior a 50 mi/h) e 13 (HCM-6 e relevo ondulado).

Considerações finais

O objetivo geral deste trabalho foi analisar as condições operacionais de intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples, sendo as faixas adicionais, a rodovia 2+1 e a duplicação. O método proposto consistiu na obtenção de dados de tráfego e de geometria de um trecho experimental, seguida da análise dos níveis de serviço locais utilizando a 6^a e a 7^a edições do HCM.

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...

J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

Os resultados obtidos aplicando o HCM-7 indicaram que as faixas adicionais podem promover a melhoria de um nível de serviço, que podem perdurar por 7 a 10 anos até que sejam superadas pelo crescimento do volume de tráfego. Da mesma forma, as rodovias 2+1 podem melhorar a condição operacional significativamente durante 16 anos, dispensando a duplicação da rodovia nesse período. A partir dos resultados encontrados com o HCM-6, foi possível avaliar o efeito do enquadramento do relevo entre plano e ondulado, o que pode gerar uma diferença de um nível de serviço. Trechos com relevo plano apresentam resultados que demoram em média 6 anos para se equivalerem aos resultados obtidos para trechos com relevo ondulado.

Em relação a comparação dos resultados dos níveis de serviço entre o HCM-7 e HCM-6, foi possível observar uma diferença de dois graus do nível de serviço para melhor no HCM-7, se comparados aos resultados encontrados com o HCM-6. A diferença de atingimento do nível de serviço “D” para relevo ondulado entre ambos os manuais é de 20 anos, ou seja, o nível de serviço calculado com o HCM-7 passa a ser o mesmo nível de serviço determinado utilizando o HCM-6 próximo do 20º ano de projeto. Essas diferenças entre os manuais tendem a ter um grande efeito no gerenciamento das rodovias brasileiras, sendo necessário, em trabalhos futuros, aplicar os dois métodos em outros trechos experimentais a fim de verificar se os níveis de serviço tendem a ser tão diferentes quanto aos que foram encontrados neste trabalho.

Cabe dizer, ainda, que os critérios de segmentação propostos pelo HCM-7 resultaram em um número de segmentos homogêneos consideravelmente elevado, sobretudo em função da transição das zonas de ultrapassagens proibidas e permitidas. Isso faz com que uma mesma rampa, ou rampas sucessivas, fossem divididas em segmentos com a mesma declividade, porém com extensões menores. Para trabalhos futuros, seria interessante avaliar melhor o efeito dessa subsegmentação nos resultados obtidos com o novo método do HCM para análise de rodovias de pista simples.

Importante mencionar, também, que o método do HCM-7 não pareceu ser muito sensível ao percentual de veículos pesados na frota, ainda mais que, no caso do trecho experimental, esse valor foi de aproximadamente 75%. Esse pode ser um dos motivos para a diferença significativa para a obtenção dos níveis de serviço, haja vista que o método do HCM-6 era mais sensível à porcentagem de veículos pesados. Outro aspecto capaz de explicar as diferenças dos resultados encontrados com os manuais pode ser a adoção de uma nova medida de serviço, a densidade de veículos em pelotões, fazendo com que as velocidades baixas não determinem, necessariamente, níveis de serviço ruins. Recomenda-se, para trabalhos futuros, que esses aspectos sejam melhor investigados, sobretudo buscando-se adaptar o novo método do HCM-7 para análise de rodovias de pista simples brasileiras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Concessionária Rota do Oeste pelas informações relacionadas ao trecho experimental, e à FAPEMIG (processo TEC-APQ-03818-18) e ao CNPq (processos 315001/2021-6 e 439250/2018-8) pelo apoio financeiro. Agradecem, ainda, à CAPES, à UFMG e à UEFS pelo suporte à pesquisa.

Referências bibliográficas

- » AASHTO (2018). *A policy on geometric design of highways and streets*. Washington, DC. E-book.
- » ANTT (2007). *Programa de exploração rodoviária*. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Anexo III edital de concessão 005/2007. Brasília.
- » ANTT (2020). *Contrato de concessão nº 01/2020*. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Edital de Concessão nº 02/2019, BR-101/SC (Via Costeira). Brasília.
- » Austroads (2019). *Passing lanes safety and performance* (Research Report AP-R596-19). Collective of the Australian and New Zealand Transport Agencies.
- » Bai, T., Ahmed, A., Labi, S., & Sinha, K. (2017). Traffic volume benchmarks for major arterial widening versus expressway construction: Exploratory approach. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.000006>
- » Bessa Jr., J. E. (2015). *Medidas de desempenho para avaliação da qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil* (Tesis de doctorado). Universidade do Estado de São Paulo, São Carlos.
- » Bessa Jr., J. E., & Setti, J. R. (2018). Evaluating measures of effectiveness for quality-of-service estimation on two-lane rural highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(9). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000178>
- » Bergh, T., Remgard, M., Carlsson, A., Olstam, J., & Strömngren, P. (2016). 2+1-roads: Recent Swedish capacity and level-of-service experience. *Transportation Research Procedia*, 15, 331-345. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.028>
- » Brilon, W., & Weiser, F. (2006). Two-lane rural highways: The German experience. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 988, 38-47.
- » CNT (2022). *Pesquisa CNT de rodovias: Relatório gerencial*. Confederação Nacional do Transporte. <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>.
- » DNER (1999). *Manual de projeto geométrico de rodovias rurais*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- » DNIT (2020). *Edital RDC Eletrônico nº 291/2020-00*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. BR-470/RS, km 89,00 al km 153,50. Brasília, DF.
- » DNIT (2006a). *Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários: Instruções para apresentação de relatórios*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Brasília, DF.
- » Dowling, R., Ryus, P., Schroeder, B., Kyte, M., Creasey, F. T., et al. (2016). *Planning and preliminary engineering applications guide to the Highway Capacity Manual* (National Cooperative Highway Research Program NCHRP Report 825). Washington, DC. E-book.
- » FDOT (2020). *Quality level of service handbook*. Florida Department of Transportation. Tallahassee, FL.

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

- » FHWA (1985). *Passing lanes and other operational improvements on two-lane highways*. Federal Highway Administration. McLean, VA.
- » Gattis, J. L., Bhave, R., & Duncan, L. K. (2006). Alternating passing lane lengths. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1961, 16-23. <https://doi.org/10.1177/0361198106196100103>
- » ITE (2016). *Transportation planning handbook*. Institute of Transportation Engineers. E-book. New Jersey.
- » Melo, R. A., & Setti, J. R. (2007). Fluxos mínimos de veículos para implantação de faixas adicionais em aclives de rodovias de pista simples. *Transportes*, 15(1), 16-23. <https://doi.org/10.14295/transportes.v15i1.43>
- » McTrans (2023). *Highway capacity software*. McTrans Center, University of Florida. <https://mctrans.ce.ufl.edu/highway-capacity-software-hcs/>
- » Mon-Ma, M. L. (2008). *Adaptação do HCM-2000 rodovias de pista simples com faixas adicionais típicas do estado de São Paulo* (Tesis doctoral). Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- » NDOR (2010). *Rules and regulation of the Board of Public Roads Classifications and Standards*. Nebraska Department of Roads. Omaha, NE.
- » Oliveira, J. K. S., & Bessa Jr., J. E. (2022). Adaptation of the HCM for the analysis of two-lane rural highways without passing lanes in Brazil. *Transportes*, 30(3). <https://doi.org/10.14295/transportes.v30i3.2690>
- » Pereira, H. M., & Bessa Jr., J. E. (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*, Rio de Janeiro, RJ.
- » Pereira, H. M. (2018). *Sistema de suporte à decisão para priorização de investimentos em rodovias utilizando inteligência geográfica* (Dissertação de Mestrado em Geotecnia e Transportes). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- » Jain, M. P., Mane, A., Arkatkar, S. S., & Joshi, G. J. (2019). Capacity estimation on two-lane hilly roads under heterogeneous traffic conditions in India. *Transportation Research Procedia*, 48, 3,197–3,210. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.161>
- » Polus, A., & Pollatschek, M. A. (2004). Criteria for widening of two-lane rural highways. *Transport Policy*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.06.001>
- » Romana, M. G., & Hernando, D. (2016). Obtaining a maximum AADT sustained by two-lane roads: An application to the Madrid region in Spain. *Transportation Research Procedia*, 14, 3,209–3,217. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.263>
- » Senna, L. A. S. (2014). *Economia e planejamento dos transportes*. Elsevier.
- » 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). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- » TRB (2016). *Highway capacity manual 6th edition: A guide for multimodal mobility analysis*. Transportation Research Board. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, D.C. E-book.
- » TRB (2022). *Highway capacity manual 7th edition: A guide for multimodal mobility analysis*. Transportation Research Board. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, D.C. E-book.

Análise de intervenções de ampliação de capacidade...
J. E. BESSA JÚNIOR E I. VIEIRA SANTOS

- » Utimura, F. S., Setti, J. R., Egami, C. Y., & Mon-Ma, M. L. (2007). Verificação da acurácia de estimativas de nível de serviço em rodovias de pista simples no estado de São Paulo. *Anais do XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Rio de Janeiro, RJ.
- » Washburn, S. S., Watson, D., Bian, Z., Al-Kaisy, A., Jafari, A., et al. (2018). Improved analysis of two-lane highway capacity and operational performance. *National Cooperative Highway Research Program NCHRP, Report 255*. Washington, DC. E-book.

Igor Vieira Santos / igorvs.eng@gmail.com

Mestre em Geotecnia e Transportes pela UFMG, Pós-Graduado em Transportes e Trânsito pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, com graduação em Engenharia Civil pela Universidade Fumec e Curso Técnico de Transportes e Trânsito também pelo CEFET/MG. É Professor do Magistério Superior na Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), lotado no Departamento de Tecnologia (DTEC). Atua, principalmente, nos seguintes temas: Elaboração de estudos de tráfego, processamento de dados de pesagem, estudos de viabilidade técnico-econômica e estudos de capacidade e níveis de serviço.

José Elievam Bessa Júnior / elievamjr@gmail.com

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 do Magistério Superior na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), lotado no Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia (DETG). Atua, principalmente, nos seguintes temas: Simulação de Tráfego, Capacidade viária e nível de serviço e Controle de tráfego urbano.