

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**ANÁLISE DE INTERVENÇÕES PARA ADEQUAÇÃO
DO NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA
SIMPLES COM BASE NO HCM**

Igor Vieira Santos

Belo Horizonte

2023

Igor Vieira Santos

**Análise de intervenções para adequação do nível de serviço
em rodovias de pista simples com base no HCM**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientador: José Elievam Bessa Júnior

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2023

S237a Santos, Igor Vieira.
Análise de intervenções para adequação do nível de serviço em rodovias de pista simples com base no HCM [recurso eletrônico] / Igor Vieira Santos. – 2022.
1 recurso online (121 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: José Elievam Bessa Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 104-121.

Bibliografia: f. 95-103.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Transportes - Teses. 2. Rodovias - Teses. 3. Rodovias - Planejamento - Teses. 4. Rodovias - Projetos - Teses. 3. Engenharia rodoviária - Teses. 5. Tráfego - Teses. 6. Engenharia da tráfego - Teses. I. Bessa Júnior, José Elievam. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 656(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise de intervenções para adequação do nível de serviço em rodovias de pista simples com base no HCM.

IGOR VIEIRA SANTOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES. Aprovada em 20 de dezembro de 2022, pela banca constituída pelos membros:

Prof. José Elievam Bessa Junior - Orientador (UFMG)
Prof. Alexandre Hering Coelho (UFSC)
Prof. Gustavo Riente de Andrade (McTrans - University of Florida)

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Hering Coelho, Usuário Externo**, em 22/12/2022, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Elievam Bessa Junior, Professor do Magistério Superior**, em 22/12/2022, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Riente de Andrade, Usuário Externo**, em 05/01/2023, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1985963** e o código CRC **BDFCAD1**.

*À minha mãe, Catarina (in memoriam), ao
meu pai, Osmar, ao tio Di e à minha família
por tanto amor.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a espiritualidade amiga, pela força nos momentos cruciais. A minha mãe (*in memoriam*), a quem eu devo tudo, por tanto amor, dedicação, incentivo, carinho e, sobretudo, pelo exemplo. Ao meu pai, o melhor parceiro musical deste mundo. Ao tio Di, por ter sido um pai. Aos meus ancestrais por todo o esforço.

A tia Biju e ao tio Deus, por terem me acolhido tão bem após a partida da minha mãe. Aos meus padrinhos, tio Renato e tia Regina, ao tio Olival, tia Edna, tia Rosana, tio Antonio, Tio Caio, Tia Dora, Madalena, Beto e Cássia, que sempre me apoiaram. Aos meus queridos e amados primos, sobretudo a Raquel e o Heitor, pessoas nas quais eu busco me espelhar sempre. Aos grandes amigos Guilherme e Natale e suas famílias, que sempre me acolheram com tanto amor e generosidade. Ao Rique, Malu e Welerson pela casa com a proximidade dos “sobrinhos” que eu tanto amo.

A Manu pelos nove anos em que estivemos juntos e por ter me apresentado o amor para toda uma vida. A Júlia por ter me feito sorrir novamente, foi incrível. A Annie, Margô, Josefina, Eunice e Marilene, pela companhia no acolhimento da criança interior. Aos amigos especiais, Rodrigo e Davi, por terem marcado a minha vida ao longo da jornada da engenharia. A Grazi e a Lívia. Ao Gauguin, Alexandre e Getúlio pelas alegrias musicais.

Um agradecimento especial ao meu orientador, professor Elievam, por todos os ensinamentos, motivação, paciência, confiança, parceria, disponibilidade e momentos de descontração, isso foi fundamental. Sem dúvida um dos maiores exemplos para a minha futura carreira de docente.

Ao professor Alexandre Hering Coelho pela generosidade e pelo grande apoio ao me ensinar a programação em Python, além de ser um dos melhores anfitriões que eu conheço.

A todos os professores e servidores do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, em especial a Professora Leise, por ensinar um pensamento livre, fomentando a semente da pesquisa científica em cada um de nós. A Maria do Núcleo de Apoio Pedagógico da Escola de Engenharia pelo apoio psicológico fundamental. A secretária Larissa, que sempre nos atendeu de forma premente e generosa.

À toda equipe da Concremat e Certare, em especial ao Fernando, Fran, Andrey, Rafa, Mike, Duda, Fernanda e Mari, obrigado por confiarem em mim mesmo na reta final do mestrado.

A Maiara, Raul, Fábio, João Pedro, Arilena, Guilherme e Túlio pelo apoio em Brasília. A Andressa, Miguel, Thais, Leandro, Saulo, Silvestre, Letícia e Tahísa e demais amigos da Infracplan, Engetraf, ANTT e DNIT.

Aos queridos amigos Rafael, Walmir, Vitor, Kerol, Pedro, Debora, Nath e Vinicius pela companhia indispensável na universidade, além do Professor João Mário por ter aberto as portas da estatística.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento à pesquisa no âmbito do Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da UFMG e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento sob número de processo APQ-03818-18.

A todos que contribuíram de alguma forma para minha formação acadêmica, profissional e pessoal, meus sinceros agradecimentos.

*“Não é sem luto, mas pode ser uma luta bonita, verdadeira e acolhedora.”
(Raquel Vieira Resende)*

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 desta dissertação 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 6ª (HCM 2016) e 7ª (HCM 2022) edições do *Highway Capacity Manual* (HCM). Para indicação das intervenções de ampliação de capacidade, foram especificadas faixas adicionais com extensão de aproximadamente 1,60 km e espaçamento mínimo de 3,0 km. Os resultados foram obtidos considerando uma demanda de 6.352 veic/dia e 626 veic/h no ano de inicial, utilizando uma taxa de crescimento de 3% para projeção dos volumes de tráfego ao longo do período de projeto. Aplicando o HCM 2022, os resultados indicaram que as faixas adicionais podem promover a melhoria de um nível de serviço que perdura por um período de 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. No HCM 2016, o enquadramento do relevo entre plano e ondulado pode gerar uma diferença de um nível de serviço. Trechos com relevo plano apresentaram 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 obtidos com o HCM 2022 e HCM 2016, foi possível observar uma diferença de dois níveis de serviço, com o HCM 2022 apresentando resultados mais favoráveis. A diferença para atingir o nível de serviço “D” para relevo ondulado com os dois manuais foi de 20 anos.

Palavras-chave: Capacidade, Faixa adicional, Rodovia 2+1, Nível de serviço, Rodovias de pista simples.

ABSTRACT

When operational problems occur on two-lane rural highways, many managers consider duplication 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 has two main steps: i) data collection and treatment; ii) operational analysis by determining the levels of service using the 6th (HCM 2016) and 7th (HCM 2022) editions of the Highway Capacity Manual (HCM). To indicate a widening intervention, the passing lanes were analyzed with a length of approximately 1.60 km and minimum spacing of 3.0 km. The results were obtained considering a traffic demand of 6.352 veh/day and 626 veh/h in the first year of operation, using a growth rate of 3% to prospect the traffic volumes along the project period. The results obtained by applying the HCM 2022 indicated that the passing lanes could promote one level of service improvement lasting for seven to ten years. Similarly 2+1 highways can improve the operational conditions for 16 years, and highway duplication is unnecessary during this period. In the 2016 HCM, the terrain classification in level or rolling can produce a difference of one level of service. Segments with level terrain presented results that take an average of six years to be equivalent to those obtained for segments with rolling terrain. Regarding the comparison of the results of the level of service obtained with HCM 2022 and HCM 2016, it was possible to observe a difference of two levels of service, with HCM 2022 presenting better levels of service. The difference to achieve the level of service "D" for rolling terrain with both manuals was 20 years.

Keywords: Capacity, Passing lane, 2+1 road, Level of service, Two-lane rural highways.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Redução do investimento público federal em rodovias como percentual do Produto Interno Bruto (PIB).....	19
Figura 2: Efeito da faixa de ultrapassagem na PTSF.....	33
Figura 3: Redução da porcentagem de veículos em pelotões em função da extensão da faixa de ultrapassagem em relevo plano.....	36
Figura 4: Layout de segmentos rodoviários com faixa adicional considerados no estudo	38
Figura 5: Rodovia 2+1 configuração norte-americana	41
Figura 6: Rodovia 2+1 configuração europeia	41
Figura 7: Limites de volume de tráfego diário que justificam a ampliação em função dos custos de construção e dos tipos de relevo do terreno.....	45
Figura 8: Critério para determinação do NS em rodovias de pista simples de classe I.....	52
Figura 9: Fluxograma método HCM2016 pista simples	53
Figura 10: Regiões das faixa de ultrapassagem.....	56
Figura 11: Fluxograma método HCM2016 e HCM202 pista dupla	57
Figura 12: Fluxograma método HCM2022 pista simples	60
Figura 13: Fluxograma método HCM2022 pista simples (análise curva horizontal).....	61
Figura 14: Fluxograma do método.....	65
Figura 15: Trecho experimental.....	70
Figura 16: Representação da classe vertical e declividades em módulo (HCM 2022).....	73
Figura 17: Representação variação LFO.....	78
Figura 18: Representação variação LFO (segmentação diferente por sentido de tráfego)	78

Figura 19: Representação variação LFO (compatibilização segmentos homogêneos)	79
Figura 20: NS cenários 1 x cenário 5.....	83
Figura 21: NS cenários 1 x 2 x 3 (a) e cenários 5 x 6 x 7 (b).....	83
Figura 22: Volumes de atingimento NS (sentido norte) cenários 1(a), 5(b), 2(c), 6(d), 3(e),7(f)	84
Figura 23: NS cenários 9 x cenário 13.....	85
Figura 24: NS cenários 9 x 10 x 11 x 12 (a) e cenários 13 x 14 x 15 x 16 (b).....	85
Figura 25: Volumes de atingimento NS (sentido norte) cenários 9(a), 13(b), 10(c), 14(d), 11(e), 15(f), 12 (g) e 16(h)	86
Figura 26: NS cenário 5 (HCM 2022) x cenário 13 (HCM 2016).....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diretrizes para seleção do nível de serviço para projetos de rodovia (EUA)	26
Tabela 2: Critérios técnicos para definição do relevo (EUA)	27
Tabela 3: Diretrizes de seleção do nível de serviço para projetos de rodovia rurais (Brasil) ..	28
Tabela 4: Critérios técnicos para definição do relevo (Brasil)	29
Tabela 5: Classes de projeto e critérios de classificação técnica.....	30
Tabela 6: Comprimentos ideais de faixas de ultrapassagem em rodovias de pista simples.....	33
Tabela 7: Comprimento da faixa de passagem com limite de velocidade em torno de 88 km/h	34
Tabela 8: Comprimentos ideais de faixas de ultrapassagem	36
Tabela 9: Comprimento e espaçamento entre faixas de passagem	37
Tabela 10: Fluxos mínimos de veículos para implantação terceira faixa	39
Tabela 11: Volume Diário, Volume Horário e Capacidade para Rodovias de Pista Simples..	44
Tabela 12: Critérios para determinação do NS em rodovia de pista simples de classe I e II...	51
Tabela 13: Critérios para determinação do nível de serviço com base na FD (HCM 2022) ...	59
Tabela 14: Redução da velocidade de fluxo livre em função da classificação dos alinhamentos verticais e horizontais.....	64
Tabela 15: Cenários de análise	67
Tabela 16: Rampas verticais trecho experimental	71
Tabela 17: Classificação vertical proposta HCM 2022	73
Tabela 18: Rampas verticais trecho experimental após ponderação	74
Tabela 19: Curvas horizontais trecho experimental	75

Tabela 20: Relação das faixas adicionais existentes no trecho experimental	75
Tabela 21: Identificação segmentos de ultrapassagem proibida e permitida	76
Tabela 22: Determinação VMD para trecho experimental - PP-05 (Ano de 2022)	79
Tabela 23: Projeção do VMD e volume horário trecho experimental - PP-05 (Ano de 2022)	80
Tabela 24: Relação das faixas adicionais projetadas no trecho experimental.....	81
Tabela 25: Relação das faixas adicionais projetadas para rodovia 2+1 no trecho experimental	82
Tabela 26: Resultado dos níveis de serviço para todos os cenários sentido norte.....	88
Tabela 27: Resultado dos níveis de serviço para todos os cenários sentido sul	89

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ARTESP	Agência de Transporte do Estado de São Paulo
ATS	<i>Average Travel Speed</i>
AUSTROADS	Organização de Transporte Rodoviário na Austrália e Nova Zelândia
CMF	<i>Crash Modification Factor</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
cp/h	Carros de passeio equivalente por hora
DER/MG	Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
EVTEA	Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental
FFS	Velocidade de fluxo livre
FD	<i>Follower Density</i>
FDOT	Departamento de Transportes do Estado da Flórida
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
HIDOT	Departamento de Transportes do Estado de Illinois
HSM	<i>Highway Safety Manual</i>
ITE	<i>Institute Transportation Engineer</i>
LCCA	<i>Lifecycle Cost Analysis</i>
Lpl	Comprimento Faixa de Ultrapassagem
MDOT	Departamento de Transportes do Estado de Michigan
NDOR	Nebraska Department of Roads
NS	Nível de serviço
pc/h	Carros de passeio por hora
PF	<i>Percent Followers</i>
P _{HV}	Percentual de veículos pesado
Pi	Ponto de Interseção
PER	Programa de Exploração Rodoviária

PFFS	<i>Percent of Free Flow Speed</i>
PNCT	Plano Nacional de Contagem de Tráfego
PROCOFRE	Programa de Concessões de Rodovias Federais
PTSF	<i>Percent Time-Spent-Following</i>
SPT	Sistema de Planejamento de Transporte
TCU	Tribunal de Contas da União
TRANSESP	Empresa Pública de Pesquisa e Planejamento de Transportes de São Paulo
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TxDOT	Departamento de Transportes do Estado do Texas
veh/h	Veículos por hora
veic/h	Veículos por hora
VMD	Volume médio diário
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	22
1.2	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	NÍVEL DE SERVIÇO COMO CRITÉRIO PARA INDICAÇÃO DE OBRAS DE AMPLIAÇÃO DE CAPACIDADE.....	24
2.1.1	<i>Hora de projeto</i>	25
2.1.2	<i>Contexto internacional</i>	26
2.1.3	<i>Contexto nacional</i>	28
2.2	PRINCIPAIS OBRAS DE AMPLIAÇÃO DE CAPACIDADE DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES	31
2.2.1	FAIXA ADICIONAL	31
2.2.1.1	FAIXA DE ULTRAPASSAGEM.....	32
2.2.1.2	FAIXA ADICIONAL DE SUBIDA (TERCEIRA FAIXA)	38
2.2.2	RODOVIA 2+1	40
2.2.3	DUPLICAÇÃO	42
2.2.4	CRITÉRIOS PARA AMPLIAÇÃO DE CAPACIDADE EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES	43
2.2.4.1	VOLUME LIMITE PARA OPERAÇÃO DE UMA RODOVIA EM PISTA SIMPLES	43
2.2.4.2	CRITÉRIOS PARA AMPLIAÇÃO DE CAPACIDADE EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES COM BASE EM ANÁLISE ECONÔMICA	45
2.3	PARÂMETROS DE PROJETO RELEVANTES PARA INTERVENÇÕES DE AMPLIAÇÃO DE CAPACIDADE	48
2.3.1	PERÍODO DE PROJETO	48
2.3.2	TAXA DE CRESCIMENTO	49
2.4	<i>HIGHWAY CAPACITY MANUAL (HCM)</i>	49
2.4.1	HCM 2016 (6ª EDIÇÃO) PISTA SIMPLES	50

2.4.2	HCM 2016 (6ª EDIÇÃO) PISTA DUPLA (MÚLTIPLAS FAIXAS).....	56
2.4.3	HCM 2022 (7ª EDIÇÃO).....	58
2.4.4	HCM 2016 x HCM 2022.....	63
3	MÉTODO.....	65
3.1	COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS	65
3.2	ANÁLISE OPERACIONAL DAS INTERVENÇÕES DE AMPLIAÇÃO DE CAPACIDADE	66
3.3	COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE SERVIÇO HCM 2016 x HCM 2022.....	69
4	TRECHO EXPERIMENTAL.....	70
5	RESULTADOS DOS NÍVEIS DE SERVIÇO	81
5.1	HCM 2022	82
5.2	HCM 2016.....	84
5.3	HCM 2022 x HCM 2016.....	87
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
6.1	PREMISSAS CONSIDERADAS	90
6.2	HCM 2016.....	91
6.3	HCM 2022	91
6.4	HCM 2016 x HCM 2022.....	92
6.5	TRABALHOS FUTUROS	93
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
	APÊNDICE “A”	104

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de um sistema de transporte com níveis elevados de qualidade e eficiência contribui para fomentar as atividades econômicas, gerando benefícios à sociedade. A matriz de transporte nacional possui maior participação do modo rodoviário, responsável aproximadamente por 65% da movimentação de mercadorias e 90 % da movimentação de passageiros (CNT, 2022).

De acordo com SNV (2019), o Brasil possui 1.720.700 km de rodovias, dos quais 12,4% encontram-se pavimentadas, 78,5% não estão pavimentadas e 9,1% correspondem a rodovias planejadas. As rodovias federais totalizam 30,6 %, dos quais 87,55% são de pista simples e 12,45% correspondem a rodovias de pista dupla. Fica, portanto, evidente a maior participação das rodovias com plataforma em pista simples na malha viária nacional.

Nos Estados Unidos, as rodovias de pista simples correspondem a 80% de todas as vias rurais pavimentadas, mas transportam apenas 30% de todo o tráfego. Algumas dessas rodovias apresentam, com frequência, problemas operacionais e de segurança causados por uma variedade de fatores, podendo necessitar de melhorias operacionais para redução dos níveis de congestionamento (TRB, 2016).

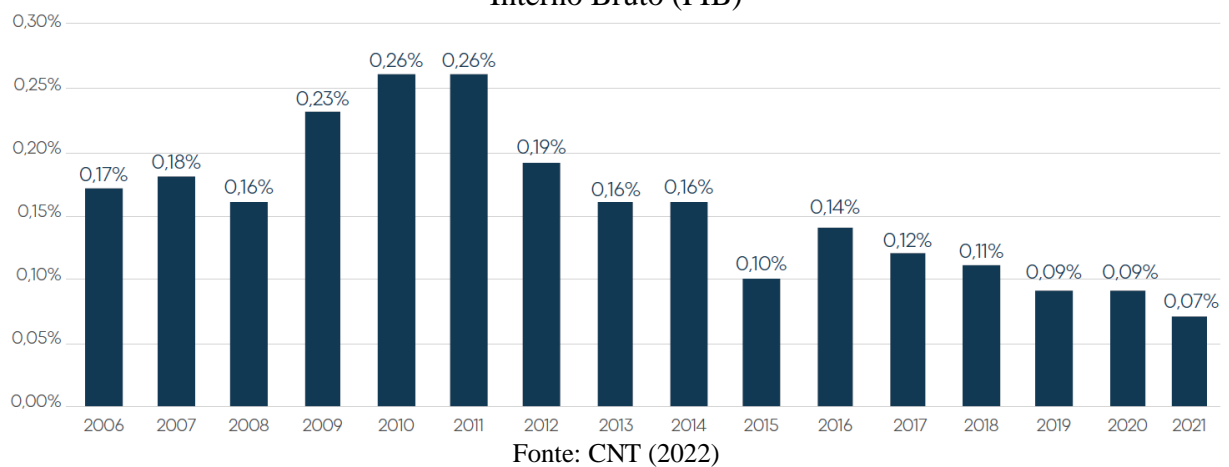
No Brasil, os investimentos em infraestrutura normalmente têm o poder público como principal financiador. Embora tenha havido nos últimos anos uma maior participação dos investimentos privados, estes ainda não são suficientes para atender as necessidades. Atualmente, 66% da malha viária total das rodovias federais são classificadas, quanto ao estado geral, na condição de 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. Diante deste contexto, é possível inferir quanto a necessidade de investimentos para melhoria das condições operacionais de parte da malha rodoviária.

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. Torna-se

imprescindível um planejamento adequado, podendo ser necessária a priorização de investimentos para uma gestão eficiente (Senna, 2014). Este cenário de escassez de recursos frente à necessidade é evidenciado ao se comparar o investimento público federal em rodovias como percentual do PIB, que foi reduzido de 0,26% em 2010 para 0,07% em 2021 (CNT, 2022), conforme ilustrado na Figura 1. Como uma das ferramentas de apoio à gestão, o processo de avaliação de projetos de transporte tem como principal objetivo orientar quanto às melhores alternativas que poderão ser implantadas, de forma a auxiliar na tomada de decisão (Campos, 2013).

Figura 1: Redução do investimento público federal em rodovias como percentual do Produto Interno Bruto (PIB)



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). Uma das formas de mensurar a efetividade das soluções propostas nos projetos consiste em desenvolver uma análise comparativa da condição operacional atual e futura, dentre as alternativas objeto de estudo. 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 (TRB, 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.

Diversas intervenções podem ser realizadas a fim de ampliar a capacidade do sistema viário existente, melhorando as condições de trafegabilidade. 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), há mais de 35 anos, propôs cinco concepções de melhoria para rodovia de pista simples, como medidas alternativas à duplicação, adotando o nível de serviço como representativo da condição operacional: i) faixa de ultrapassagem; ii) trechos de duplicação reduzidos (faixa de ultrapassagem em ambos os sentidos, de forma simultânea); iii) readequação dos acostamentos para utilização como faixa de tráfego; iv); faixas adicionais em rampas ascendentes; v) faixas de ultrapassagem sequenciais, solução similar a rodovia 2+1, que consiste na adaptação da seção transversal incluindo uma faixa de tráfego intermediária alternando de direção em intervalos de 1 a 3 km. Cabe destacar que a rodovia 2+1 opera de forma diferente de uma faixa reversível. Na rodovia 2+1, a faixa intermediária é implantada no segmento favorecendo um sentido de tráfego; no segmento subsequente, a faixa intermediária será utilizada pelo outro sentido de tráfego, e assim sucessivamente, variando o sentido de tráfego atendido. Ou seja, o segmento que possui a faixa intermediária atende apenas um sentido de tráfego em cada segmento, ao contrário da faixa reversível onde o segmento que possui a faixa intermediária atende ambos os sentidos de tráfego, variando o sentido no tempo, de acordo com o esquema de operação.

Na mesma esteira, o manual de projeto geométrico do DNER (DNER, 1999) apresenta as seguintes opções como melhorias operacionais para rodovias de pista simples: i) faixa de ultrapassagem; ii) trechos de duplicação reduzidos; iii) baias de ultrapassagem (trechos curtos de inclusão de uma faixa adicional variando de 60 a 170 m); iv); faixas adicionais em rampas ascendentes; v) faixas de ultrapassagem sequenciais. Embora essas soluções sejam, basicamente, apresentadas no manual, apenas as faixas adicionais em rampas ascendentes são implementadas na maioria dos projetos viários, sendo a duplicação uma outra alternativa comum.

Nesse aspecto, cabem as seguintes ressalvas: os termos “ampliação de capacidade” (ANTT, 2020) e “adequação de capacidade” (DNIT, 2020) são largamente empregados no setor rodoviário, com destaque para Estudos de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental (EVTEA), além de editais e contratos de concessões rodoviárias. Ambos os termos são usados com o mesmo significado, sendo utilizados para indicar intervenções relacionadas a 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, são mantidos nesta dissertação. Como exemplo desta prática, a ANTT (2007) considera a implantação de 77,80 km de faixa adicional na BR-153/SP como obra de ampliação de capacidade. De forma análoga, DNIT (2006a) também considera a implantação de terceira faixa como obra de adequação de capacidade.

O projeto de pesquisa NCHRP (2023), intitulado *Reliability and Quality of Service Evaluation Methods for Rural Highway*, está previsto para ser concluído em 2023. Tem como um dos objetivos avaliar se há aumento de capacidade em segmentos com faixa adicional, uma vez que, ao fim da faixa adicional, há um gargalo que restringe a fluidez do tráfego em função de voltar a ter uma faixa a menos no sentido de análise.

Polus e Pollatschek (2004) mencionam que, dentre as obras de ampliação de capacidade para rodovia de pista simples mais comuns, estão a duplicação, as *passing lanes* (faixas de ultrapassagem, inseridas, geralmente, em segmentos de relevo plano ou ondulado) e as *climbing lanes* (faixas adicionais, 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”, como obra de ampliação de capacidade além das *passing lanes* e *climbing lanes*.

Tendo em vista que as *passing lanes* são faixas de ultrapassagem inseridas em segmentos com relevo plano ou ondulado e as *climbing lanes* são faixas adicionais inseridas em segmentos de rampas ascendentes, a partir desse momento essas soluções serão estudadas de forma conjunta, identificadas como faixa adicional, uma vez que ambas constituem uma mesma concepção variando apenas quanto a aspectos metodológicos referentes à condição do relevo do segmento homogêneo que é objeto de análise.

Nesse contexto, surge a necessidade de obtenção da resposta para a seguinte pergunta de pesquisa: qual a melhoria operacional obtida com a execução de diferentes intervenções de adequação de capacidade em rodovias de pista simples levando em consideração os níveis de serviço?

A decisão do momento em que uma rodovia de pista simples deve passar por obras de ampliação de capacidade apresenta uma complexidade bastante significativa. Temas como tráfego gerado, taxas de crescimento para projeção dos volumes de tráfego, período de projeto, classe de projeto, hora de projeto, influência do relevo e avaliação do nível de serviço devem ser objeto de necessárias e aprofundadas discussões e avaliações técnicas, administrativas e financeiras. Entretanto, para o desenvolvimento desta dissertação, mantendo o foco no tema proposto, buscou-se abordar cada um desses assuntos de forma sucinta, possibilitando apresentar as premissas consideradas válidas e suas justificativas, conforme descrito adiante.

Cabe ressaltar que outros autores, como Bai *et al.* (2017), Melo e Setti (2007), Polus e Pollatschek (2004) e Novaes (1982), estudaram intervenções de ampliação de capacidade para rodovias de pista simples. Entretanto, nenhum deles analisou de forma conjunta intervenções como faixa adicional, solução tipo “2+1” e duplicação.

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo geral desta pesquisa foi analisar as condições operacionais de intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples. Para tanto, a partir de um trecho experimental, foram avaliadas as intervenções de ampliação de capacidade: i) faixa adicional; ii) solução tipo “2+1”; e, iii) duplicação. Para atingir o objetivo geral proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar as condições operacionais, por meio dos níveis de serviço, relacionadas com a implantação de obras de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples; e,
- b) Avaliar o impacto da utilização do novo método do HCM (TRB, 2022) em relação ao método anterior (TRB, 2016) para a determinação dos níveis de serviço em rodovias de pista simples.

1.2 Estrutura da pesquisa

Esta dissertação foi estruturada em seis capítulos, incluindo a presente introdução que contextualiza a pesquisa e apresenta os objetivos propostos. O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, que trata do nível de serviço como medida para avaliação operacional de rodovias, da definição das principais obras de ampliação de capacidade em rodovia de pista simples e da

apresentação dos procedimentos preconizados pelo *Highway Capacity Manual* (HCM) e as principais diferenças metodológicas constantes entre a 6ª (TRB, 2016) e a 7ª (TRB, 2022) edições do manual.

No Capítulo 3 foi apresentado o método proposto para atingir os objetivos, incluindo a utilização do software *Highway Capacity Software - HCS* e o desenvolvimento de algoritmos em Python para a determinação dos níveis de serviço. O Capítulo 4 apresenta o trecho experimental utilizado para aplicação do método proposto. No capítulo 5, são apresentados os níveis de serviço, comparando-se as principais diferenças entre os resultados obtidos com a adoção da 6ª (TRB, 2016) e da 7ª (TRB, 2022) edições do HCM. No Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais, assim como as limitações do método proposto e as recomendações para futuras pesquisas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são apresentados conceitos relacionados ao nível de serviço destacando as principais diferenças metodológicas entre a 6ª (TRB, 2016) e 7ª (TRB, 2022) edições do HCM para análise de desempenho operacional de rodovias de pista simples. Buscou-se ainda demonstrar divergências encontradas na literatura nacional e internacional referentes a implantação de obras de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples.

2.1 Nível de serviço como critério para indicação de obras de ampliação de capacidade

A oferta de um componente de transporte rodoviário é um processo em constante evolução. As rodovias podem ter a sua capacidade ampliada para atender às necessidades econômicas e sociais ao longo da via útil do projeto. A determinação do momento para implementação de melhorias, promovendo eficiência técnica e eficácia econômica, é uma questão chave. Tradicionalmente, obras de ampliação de capacidade são implantadas apenas quando a rodovia se encontra em condições críticas de operação, sendo conveniente estabelecer parâmetros para implantação de melhorias de infraestrutura (Bai et al., 2017).

O volume de tráfego e os níveis de serviço são parâmetros relevantes para o estabelecimento de critérios de obras de ampliação de capacidade. Esses parâmetros podem refletir a condição operacional local e, portanto, devem ser considerados (Bai et al., 2017; Jiang et al., 2014; Polus e Pollatschek, 2004).

Segundo TRB (2022) rodovias de pista simples tem uma faixa de tráfego por sentido. As ultrapassagens ocorrem na faixa de sentido contrário, quando a distância de visibilidade apropriada e gaps adequados no fluxo de tráfego oposto. Polus e Pollatschek (2004) afirmam que a decisão do momento em que uma rodovia de pista simples deve passar por obras de ampliação de capacidade é um problema complexo, incluindo questões como custo da ampliação, segurança dos usuários, atraso, conforto aos condutores, nível de serviço, aspectos ambientais e, eventualmente, custos com desapropriação.

Bai et al. (2017) descrevem que a identificação de trechos de rodovia operando em condições insatisfatórias, que necessitam de obras de ampliação de capacidade, são um problema clássico de gerenciamento de ativos e gestão de recursos. Cabe aos órgãos gestores

ou agências reguladoras a identificação das rodovias prioritárias que necessitam de investimento.

Harwood (2021) recomenda que a verificação da necessidade de implantação de intervenções de ampliação de capacidade, como faixas adicionais, seja desenvolvida considerando a utilização do HCM para uma análise operacional, em consonância com os critérios estabelecidos pela AAHSTO no manual norte americano de projeto geométrico de rodovias, AASHTO (2018), popularmente conhecido como Green Book.

Segundo o HCM (TRB, 2016 e TRB, 2022), o nível de serviço pode ser definido como uma medida que reflete a qualidade do serviço ofertado, estabelecendo uma relação com o desempenho, sob a percepção do usuário. Portanto, esses níveis, representados pelas letras de “A” a “F”, estão associados a uma relação entre a quantidade de veículos e a capacidade da via ou sistema, observadas as características geométricas locais. A capacidade representa a máxima taxa horária de fluxo de tráfego estável que pode trafegar pela seção analisada durante um dado período. DNIT (2006) recomenda a utilização dos métodos propostos pelo HCM para a determinação dos níveis de serviço das rodovias no Brasil.

2.1.1 Hora de projeto

Antes da discussão do nível de serviço aceitável para projetos rodoviários no contexto internacional e nacional cabe um esclarecimento quanto ao conceito de hora de projeto. Projetar uma rodovia para atender à máxima demanda horária prevista proporcionaria a ausência de congestionamento durante todas as horas do ano, resultando em um investimento antieconômico, pois a rodovia estaria superdimensionada ao longo das demais horas do ano. Dessa forma, é recomendável que, para o dimensionamento, seja admitido um certo número de horas em que a rodovia operará congestionada. O critério da curva da enésima hora, utilizado quando se dispõe de contagens horárias contínuas, consiste na ordenação decrescente de todos os volumes horários anuais (percentagens do VMD) para determinação do Fator Horário de Projeto “K” no ponto de inflexão da curva (DNIT, 2006b).

Portanto, embora a determinação de um nível de serviço aceitável para projetos rodoviários e o valor aceito para a hora de projeto sejam assuntos distintos, ambos parâmetros estão diretamente relacionados com a operação rodoviária. Como exemplo desta afirmação, tanto DER (2018) quanto ANTT (2017) estabelecem um nível de serviço limite para o sistema

rodoviário, no contexto de rodovias concedidas, vinculado a operação em 50 horas por ano no nível de serviço escolhido, ou seja, na 50ª hora de projeto.

Mannering e Washburn (2013) afirmam que a adoção de valores entre 10ª e 50ª hora mais carregada do ano para a hora de projeto tem sido comum nos Estados Unidos para o projeto de rodovias. Andrade et al. (2013) conduziram uma pesquisa estabelecendo valores para o fator “K” da 30ª, 50ª e 200ª hora, constatando a dificuldade de determinar precisamente o ponto de inflexão da curva, concluindo que este valor se situa normalmente entre a 50ª e 100ª hora para rodovias rurais.

2.1.2 Contexto internacional

A utilização do Nível de Serviço (NS) como medida de desempenho para oferta do sistema de transporte constitui uma prática comum. O departamento de transporte da Flórida estabelece, como limite para o planejamento e operação do sistema viário estadual, o nível de serviço “D” para vias em áreas urbanas e “C” para áreas não urbanizadas (FDOT, 2017).

FHWA (2016) menciona a recorrência de questionamentos sobre o nível de serviço mínimo a ser adotado nos projetos de rodovias norte americanas, recomendando a utilização das diretrizes estabelecidas pela American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2011).

AASHTO (2018) orienta quanto à adoção, sempre que possível, do melhor nível de serviço. Entretanto, para rodovias rurais, é desejável a manutenção do nível de serviço “C”, sendo destacado que o nível de serviço “D” também pode ser adotado em regiões de relevo ondulado ou montanhoso. As diretrizes propostas pela AASHTO consideram uma combinação entre o relevo da região e a classe funcional da rodovia, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Diretrizes para seleção do nível de serviço para projetos de rodovia (EUA)

Classe Funcional	Nível de Serviço Habitual			
	Rural (Plano)	Rural (Ondulado)	Rural (Montanhoso)	Urbano/ Suburbano
Via Expressa	B	B	C	C - D
Arterial	B	B	C	C - D
Coletora	C	C	D	D
Local	D	D	D	D

Fonte: AASHTO (2018)

Da mesma forma, ITE (2016) afirma que o nível de serviço “C” tem sido utilizado como limite aceitável para operação de rodovias arteriais nos Estados Unidos. Em alguns casos, o nível de serviço “D” tem sido aceito em regiões urbanizadas.

Uma questão relevante a se destacar é que as diretrizes para seleção do nível de serviço para projetos de rodovias rurais proposta pela AASHTO variam em função do relevo. A medida em que o relevo se torna mais acidentado se observa a tolerância de um nível de serviço inferior, sugerindo a associação de aspectos econômicos ao problema.

A definição do tipo de relevo da região estudada é um tema complexo, variando sensivelmente entre projetistas e agências de transporte em geral, pode-se perceber a adoção de critérios diferentes de acordo com o contexto analisado. A Tabela 2 apresenta a definição do relevo proposta por AASHTO (2018), TRB (2016) e KERALI *et al.* (2010). KERALI *et al.* (2010) apresentaram critérios numéricos para esta classificação, baseado no *Rise & Fall*. Segundo Klein (2005), o coeficiente *Rise & Fall*, expresso em m/km, consiste na média de subidas e descidas do trecho estudado, ou seja, é o somatório de subidas e descidas, em módulo (em metros) dividido pelo comprimento do trecho (em km).

Tabela 2: Critérios técnicos para definição do relevo (EUA)

Referência	Classificação	Descrição
TRB (2016)	Plano	Qualquer combinação de alinhamentos horizontais e verticais que permita aos veículos pesados manter, aproximadamente, a mesma velocidade que os carros de passeio. Normalmente inclui rampas curtas de até 2% de greide.
	Ondulado	Qualquer combinação de alinhamentos horizontais e verticais que provoque redução substancial das velocidades dos veículos pesados, abaixo da velocidade dos carros de passeio, sem que os veículos pesados operem em velocidade de arrasto em intervalos frequentes.
	Montanhoso	Qualquer combinação de greides e alinhamentos horizontais e verticais que obrigue os veículos pesados a operar em velocidade de arrasto por distancias significativas e intervalos frequentes.
AASHTO (2018)	Plano	As distâncias de visibilidade são determinadas em função das restrições impostas pelos alinhamentos horizontal e vertical; são geralmente longas e podem ser estabelecidas sem a necessidade de obras de grande porte ou de custos elevados.
	Ondulado	As rampas naturais provocam o surgimento frequente de segmentos viários com muitas subidas e descidas; às vezes, surgem algumas rampas mais íngremes que produzem uma restrição adicional, em termos de alinhamentos horizontal e vertical, dificultando a realização de manobras.
	Montanhoso	Ocorrem mudanças abruptas nas seções transversais e longitudinalmente, sendo necessário, frequentemente, grandes movimentações de terra para obter alinhamentos horizontais e verticais aceitáveis.
KERALI <i>et al.</i> (2010)	Geometria da Estrada	Rise & Fall (m/km)
	Reto e plano	1
	Reto e levemente ondulado	10
	Curvado e levemente plano	3
	Curvado e levemente ondulado	15
	Curvado e altamente ondulado	25
Ondulado e levemente ondulado	20	

2.1.3 Contexto nacional

No Brasil, DNER (1999) fornece orientações quanto ao nível de serviço a ser adotado, deixando a cargo do projetista esta escolha, conforme apresentado na Tabela 3. Observa-se que os níveis de serviço sugeridos por DNER são os mesmos definidos nas as diretrizes estabelecidas pela AASHTO. De maneira geral, os manuais do DNER e DNIT relacionados ao tema de projetos viários são, em grande parte, tradução dos manuais da AASHTO, em especial do *Green Book*.

Tabela 3: Diretrizes de seleção do nível de serviço para projetos de rodovia rurais (Brasil)

Tipo de Rodovia	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Via Expressa	B	B	C
Arterial	B	B	C
Coletora	C	C	D
Local	D	D	D

Fonte: DNER (1999)

Em relação ao relevo, DNER (1999) menciona tanto a classificação proposta por TRB (2016) quanto AASHTO (2018), citando ainda que embora as classificações sejam diferentes, ambas são compatíveis, coincidindo na prática na maior parte dos casos encontrados. As classificações do relevo estabelecidas pela AAHSTO e TRB se mantêm inalterada desde a década de 90, conforme consta em AAHSTO (1994) e TRB (1994).

Ainda em relação ao relevo, Senço (2008) e DER (2012) atribuíram valores numéricos para sua classificação, conforme apresentado na Tabela 4. Aparentemente, diante dos valores definidos para cada um dos tipos de relevo, é possível notar que DER (2012) estabelece parâmetros para implantação de novas rodovias, em terreno natural, tendo em vista que um terreno com aproximadamente 20% de inclinação transversal possui características de elevada sinuosidade. Por outro lado, Senço (2008) classifica desníveis com inclinação inferiores a 1% como relevo plano, inclinações entre 1% e 4% como relevo ondulado, inclinações constantes em torno de 4% como relevo montanhoso e superiores a 4% como relevo escarpado. Ocorre que a classificação proposta por Senço (2008) não consta nos manuais de projeto nacionais e, por esse motivo, não é utilizada nesta dissertação.

Tabela 4: Critérios técnicos para definição do relevo (Brasil)

Referência	Classificação	Descrição
SENÇO (2008)	Plano	Desníveis inferiores a 10 metros por km
	Ondulado	Desníveis entre 10 e 40 metros por km
	Montanhoso	Desníveis constantes em torno de 40 metros por km
	Escarpado	Desníveis superiores a 40 metros por km
DER (2012)	Plano	Inclinação Transversal de Terreno $\approx 5\%$
	Ondulado	Inclinação Transversal de Terreno $\approx 20\%$
	Montanhoso	Inclinação transversal de Terreno $\approx 70\%$

Retomando a discussão sobre a orientação quanto ao nível de serviço, DNER (1999) estabelece que uma rodovia de pista dupla com controle parcial de acessos deve ser implantada quando uma rodovia de pista simples ocasione níveis de serviço inferiores aos aceitáveis, sem mencionar com exatidão quais são os níveis de serviço aceitáveis. Dessa forma, o momento de transição de uma rodovia em pista simples para pista dupla não é estabelecido de forma clara.

Por outro lado, para análise do nível de serviço para oferta de infraestrutura pelo setor privado é necessária a introdução do conceito de concessões. Gonze (2014) afirma que a concessão de rodovias consiste em uma das formas de financiamento para ampliação, manutenção ou recuperação da infraestrutura existente, por meio da transferência do gerenciamento do ativo para um parceiro privado, mediante a cobrança de tarifa dos usuários para custear as melhorias previstas em contrato.

No estado de São Paulo, as concessionárias sob supervisão da Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) adotam a operação em 50 horas por ano no NS D como parâmetro limite (gatilho) para implantação de obras de ampliação de capacidade (DER, 2018). Santos e Ribeiro (2018) definem o termo “gatilho” como um evento que ocorre quando determinado parâmetro é atingido, resultando na implantação de uma intervenção de ampliação de capacidade.

Enquanto ARTESP (DER, 2018) define de forma taxativa o parâmetro limite para implantação de melhorias de ampliação de capacidade, ANTT (2017) determina a operação em 50 horas por ano no Nível de Serviço referente a Classe de Projeto I como “gatilho”. Esta Classe de Projeto I supramencionada consta em DNER (1999), que estabelece classes para determinação das características de projeto de uma rodovia, conforme apresentado na Tabela 5. Embora segundo o próprio manual (DNER, 1999) os critérios apresentados estejam destacados com preliminares, constituem a principal fonte de consulta para classificação técnica de uma

rodovia em estudos e projetos nacionais. Diante desse contexto é possível observar uma tentativa de se vincular a classe de projeto a parâmetros operacionais, entretanto a classe de projeto está ligada, sobretudo, ao volume de movimentação de terra, enquanto os parâmetros operacionais estão ligados ao fluxo e velocidade, por exemplo.

Tabela 5: Classes de projeto e critérios de classificação técnica

Classe de projeto	Características	Critérios de classificação técnica
0	Via Expressa - controle total de acesso	Decisão administrativa
IA	Pista Dupla - controle parcial de acesso	Quando os valores de tráfego previstos ocasionam níveis de serviço em uma rodovia de pista simples inferiores aos aceitáveis
IB	Pista simples	Volume Horário de Projeto (VHP) 10º ano > 200 veic./h Volume Médio Diário (VMD) 10º ano > 1.400 veic./dia
II	Pista simples	700 veic./dia < VMD 10º ano < 1.400 veic./dia
III	Pista simples	300 veic./dia < VMD 10º ano < 700 veic./dia
IVA	Pista simples	50 veic./dia < VMD 1º ano < 200 veic./dia
IVB	Pista simples	VMD 1º ano < 50 veic./dia

Fonte: DNER (1999)

Ocorre que DNER (1999) cita como limite para operação em uma rodovia de pista simples na classe de projeto IB (Via Arterial), a manutenção do NS “C” para regiões planas e levemente onduladas e o NS “D” para regiões montanhosas e fortemente onduladas, não havendo referência do nível de serviço limite para regiões onduladas, onde se enquadra grande parte da malha viária nacional, contradizendo as sugestões constantes na Tabela 3.

Ainda no âmbito das rodovias concedidas, enquanto a ANTT, a exemplo da ARTESP (DER, 2018), recomenda a operação de rodovias concedidas até o NS “C”, adotando como “gatilho” para ampliação de capacidade a operação limite em 50 horas por ano no NS “D”, TCU (2016) defende a operação de rodovias concedidas até o NS “D”, adotando como “gatilho” o limite de 200 horas por ano no NS “E”. Ressalta-se que o fator “K” referente a 200ª hora de projeto corresponde a um valor utilizado em outros locais tendo sido, por exemplo, incluído no estudo desenvolvido por Andrade *et al.* (2013), conforme mencionado na seção 2.1.1.

ANTT (2017) parte do exposto em AASHTO (2018) e FDOT (2017) quanto a garantia de operação no NS “C”, reforçando o entendimento de que, ao pagar a tarifa de pedágio, o usuário possui, como prerrogativa, o direito a uma melhor condição operacional. Por outro lado, TCU (2016) parte das premissas adotadas nos estudos de viabilidade que deram origem a alguns editais e contratos de concessão, além da constatação de que a tarifa paga pelo usuário será

função do nível de serviço adotado como limite para indicação de obras de ampliação de capacidade. Portanto, fica evidente uma divergência de entendimento entre ANTT (2017) e TCU (2016) devido à falta de uma indicação clara na literatura nacional sobre o nível de serviço a ser considerado no projeto de rodovias.

Esse cenário reforça a necessidade do estudo de critérios técnicos que possam auxiliar na tomada de decisão quanto as melhorias operacionais decorrentes da implantação de obras de ampliação de capacidade no sistema de transportes.

2.2 Principais obras de ampliação de capacidade de rodovias de pista simples

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 faixas de subida (TRB, 2016).

No Brasil, soluções de ampliação de capacidade para rodovias de pista simples, como a duplicação e a implantação de terceira faixa, são mais comuns que soluções como as faixas de ultrapassagem contínua (DNIT, 2006a).

Um dos aspectos que destacam a importância do estudo de soluções intermediárias, alternativas a duplicação, como faixas adicionais e rodovia 2+1, além da escassez de recursos, reside no fato de que, mesmo em contratos de concessão, as obras de ampliação de capacidade previstas podem resultar em inexecuções, como na terceira etapa do Programa de Concessões de Rodovias Federais (PROCROFE), que previa a duplicação integral dos trechos concedidos, sendo posteriormente alegado pelas concessionárias a impossibilidade do cumprimento das obrigações relacionadas as obras de ampliação de capacidade em função da crise econômica a partir de 2013 (Coutinho, 2020). Nesses casos, uma solução intermediária, de menor custo, pode representar uma importante alternativa a ser considerada no processo decisório.

2.2.1 Faixa adicional

Segundo TRB (2016), uma faixa adicional pode ser definida como uma faixa acrescentada em determinado segmento de uma rodovia de pista simples para melhorar as oportunidades de ultrapassagem em um sentido. Dessa forma, as faixas de ultrapassagem podem ser inseridas em trechos de relevo plano ou ondulado. Faixas adicionais instaladas em

rampas específicas são definidas como faixa de subida (popularmente conhecidas como terceira faixa), permitindo que o tráfego leve ultrapasse os veículos mais lentos.

Elefteriadou (2014) ressalta que rodovias de pista simples são frequentemente projetadas com faixas adicionais em locais selecionados ao longo de sua extensão. No Brasil rodovias de pista simples com faixas adicionais correspondem a 21% dos 69.617 km de rodovias federais pavimentadas com predominância de perfil montanhoso ou ondulado CNT (2022).

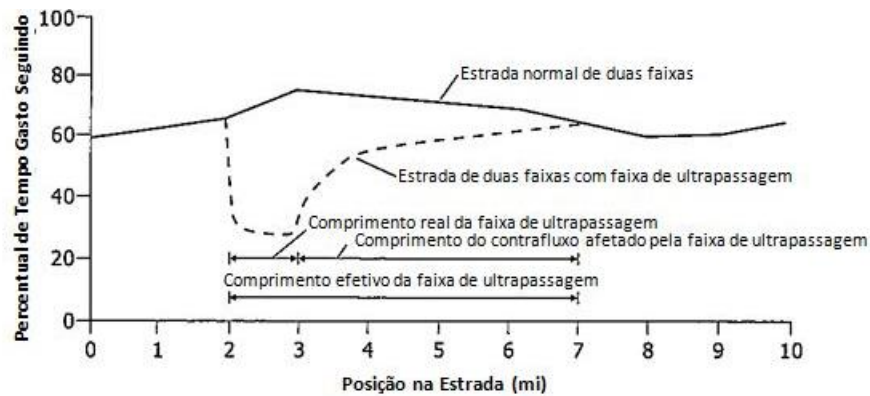
Harwood *et al.* (2021) afirmam que os procedimentos de análise operacional do HCM podem ser utilizados para análise das condições de implantação de faixas adicionais em rodovias de pista simples, destacando ainda que os critérios para a localização e implantação desses dispositivos devem seguir os preceitos de AASHTO (2018).

2.2.1.1 Faixa de ultrapassagem

De acordo com TRB (2016), a condição operacional de uma rodovia de pista simples pode ser significativamente melhorada com a adição de uma faixa de ultrapassagem, pela redução do PTSF. Entretanto, é destacado que os resultados obtidos com esse tipo de melhoria dependem fundamentalmente da extensão tanto do segmento quanto da faixa de ultrapassagem.

A Figura 2 exhibe o efeito de uma faixa de ultrapassagem, demonstrando que esse tipo de intervenção oferece benefícios operacionais por uma distância além da sua implantação, antes da PTSF retornar ao nível anterior. Cabe destacar que o comprimento efetivo da faixa de ultrapassagem corresponde a distância compreendida entre o início da faixa de ultrapassagem até ponto a jusante, onde o desempenho retorna ao valor original, ou seja, igual ao desempenho a montante da faixa de ultrapassagem (TRB, 2016).

Figura 2: Efeito da faixa de ultrapassagem na PTSF



Fonte: Adaptado HCM (2016)

A Tabela 6, a seguir apresenta o comprimento ideal para as faixas de passagem incluindo os comprimentos do *taper* de entrada e saída (L_{pi}). Segundo AAHSTO (2018), faixas de ultrapassagem mais curtas ou longas que os valores limites apresentados podem oferecer menor benefício operacional. De forma complementar, faixas de ultrapassagem com comprimentos de 0,25 milha (0,4 km) ou inferior não são eficazes para melhoria operacional.

Tabela 6: Comprimentos ideais de faixas de ultrapassagem em rodovias de pista simples

Demanda de Fluxo Direcional vd (pc/h)	Comprimento Faixa de Ultrapassagem (L_{pi})	
	(mi)	km
≤ 100	$\leq 0,50$	$\leq 0,80$
$> 100, \leq 400$	$> 0,50, \leq 0,75$	$> 0,80, \leq 1,20$
$> 400, \leq 700$	$> 0,75, \leq 1,00$	$> 1,20, \leq 1,61$
≥ 700	$> 1,00, \leq 2,00$	$> 1,61, \leq 3,22$

Fonte: TRB (2016) e AAHSTO (2018)

Harwood *et al.* (1988) tratam a faixa de ultrapassagem como uma intervenção de menor custo se comparada a duplicação e afirmam que a sua implantação em uma rodovia de pista simples pode reduzir a taxa de acidentes em cerca de 25%. Para esta afirmação os autores compararam as estatísticas de acidentes antes e após a instalação de faixas adicionais em 23 trechos situados no estado da Califórnia/EUA. Na mesma esteira HSM (2010) estabelece que o *Crash Modification Factor (CMF)*, ou fator de modificação de colisões, definido como um índice que representa a expectativa de colisões após a implantação dos melhoramentos previstos em projeto é de 0,75 para a implantação de faixas adicionais, sejam faixas de ultrapassagem ou faixa de subida (terceira faixa).

Al-kaisy e Freedman (2011) realizaram uma investigação empírica sobre os benefícios operacionais da faixa de ultrapassagem em rodovias rurais de pista simples, em dois locais no

estado de Montana. O experimento conduzido pelos autores considerou somente rodovias ruais, monitorando segmentos existentes de faixas de ultrapassagem ao longo de toda a sua extensão, incluindo seções a montante e a jusante por meio de contadores automáticos de tráfego. Os autores analisaram três medidas de desempenho, a saber: i) *Percent Followers*; ii) *Follower Density*; e, iii) *Average Travel Speed- ATS*. As faixas de ultrapassagem tiveram extensão de 2,42 km e 1,45 km. Os resultados indicaram benefícios operacionais entre 33% e 42% em um dos locais estudados, e 12% e 19% no outro. A redução dos índices do pelotão mostrou-se efetiva por aproximadamente 2,5 km após o fim da faixa adicional, sendo destacado pelos autores que, a quase 10 km do local de implantação da faixa de ultrapassagem, algum benefício residual ainda pôde ser verificado, a exemplo do comprimento efetivo da faixa de ultrapassagem de 5 milhas (aproximadamente 8 km) destacado por HCM (2016) e anteriormente apresentado na Figura 2.

Liu & Wang (2017) estudaram o comprimento da faixa de ultrapassagem suficiente para dissipar as filas formadas pela presença de veículos lentos na corrente de tráfego. Os autores propuseram um modelo baseado em um conjunto equações representativas das manobras de ultrapassagem incluindo parâmetros como o tempo de percepção / reação, comprimento do *taper* de aceleração e desaceleração da faixa adicional, velocidade, além da aceleração dos veículos leves e pesados. Os resultados obtidos pelos autores indicaram a necessidade de comprimentos das faixas de ultrapassagem consideravelmente inferiores aos valores da AASHTO (2018), conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Comprimento da faixa de passagem com limite de velocidade em torno de 88 km/h

Demanda de Fluxo Direcional (veh/h)	Comprimento Sugerido Faixa de Ultrapassagem Liu & Wang (2017) (km)	Comprimento da Faixa de Passagem Recomendado AASHTO (2018) (km)
100 - 200	0,490	0,800
201 - 400	0,620	0,800 - 1,200
401 - 700	0,880	1,200 - 1,600
701 - 1.200	1,390	1,600 - 3,200

Adaptado Liu & Wang (2017)

A publicação da 7ª edição do HCM (2022) foi abordada de forma detalhada ainda neste capítulo, entretanto, optou-se por adiantar o tema pelas importantes contribuições em relação ao assunto ora tratado, relacionado as faixas de ultrapassagem. O novo método proposto foi

baseado na publicação Washburn *et al.* (2018), que preconiza a utilização da *Follower Density (FD)* para a determinação do nível de serviço de rodovias rurais de pista simples, ao contrário da edição anterior do HCM (2016) que adotava o PTSF e a ATS para este fim.

Portanto, mesmo sabendo que a maior parte das publicações citadas anteriormente, contendo os comprimentos propostos para as faixas adicionais, levaram em consideração o PTSF e a ATS, Washburn *et al.* (2018) trazem importantes contribuições para o tema, como a recomendação de não implantar faixas de ultrapassagem em segmentos com extensão inferior a 0,40 km (0,25 mi) em rampas de 1 a 3% e 0,80 km (0,5 mi) em rampas de 4 a 5%. Outra conclusão relevante obtida pelos autores (Figura 3) indica que à medida em que a extensão da faixa de ultrapassagem se prolonga, os benefícios são atenuados, até se igualarem à condição anterior, dessa forma alguns segmentos de faixa de ultrapassagem mais curtos tendem a ser mais efetivos que um único segmento de faixa adicional longo. Faixas de ultrapassagem em relevo plano podem promover uma redução de 22,5% a 25% no PTSF.

A

Tabela 8 apresenta os comprimentos ideais para as faixas de passagem propostos por Washburn *et al.* (2018). Para a determinação dos valores propostos não houve a minimização de uma função específica, o método utilizado pelos autores consistiu na plotagem de um gráfico (Figura 3) contendo os resultados das simulações desenvolvidas. O ponto de transição da curva para uma reta foi considerando como válido para o estabelecimento dos comprimentos ótimos propostos. O gráfico apresenta o comprimento das faixas adicionais na abscissa e na ordenada os valores de redução do *Percent Followers (PF)*, porcentagem de veículos em pelotões.

Figura 3: Redução da porcentagem de veículos em pelotões em função da extensão da faixa de ultrapassagem em relevo plano

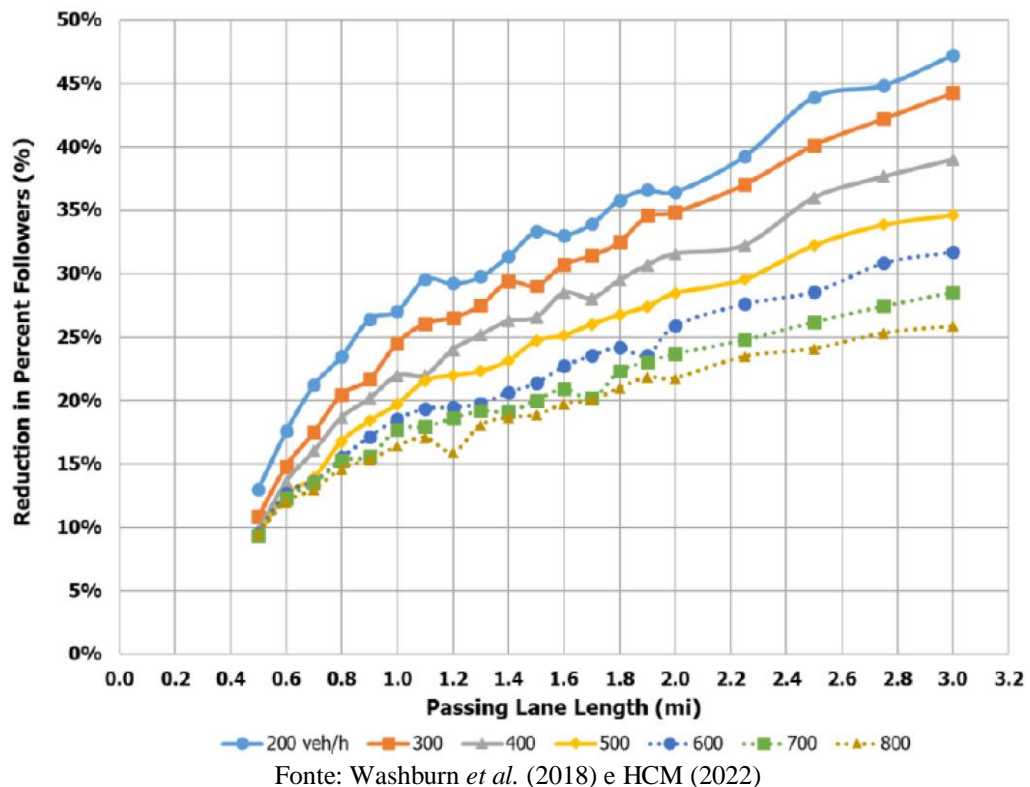


Tabela 8: Comprimentos ideais de faixas de ultrapassagem

Demanda de Fluxo direcional vd (pc/h)	Comprimento Ótimo Faixa de Ultrapassagem Washburn <i>et al.</i> (2018)		Comprimento da Faixa de Ultrapassagem AASHTO (2018)	
	(mi)	km	(mi)	km
200	0,90	1,45	> 0,50, ≤0,75	> 0,80, ≤1,20
300	1,00	1,61		
400	1,20	1,93		
500	1,20	1,93	> 0,75, ≤1,00	> 1,20, ≤1,61
600	1,60	2,57		
700	1,90	3,06		
800	2,00	3,22	> 1,00, ≤2,00	> 1,61, ≤3,22

Fonte: Adaptado Washburn *et al.* (2018) e AASHTO (2018)

Da

Tabela 8 é possível observar que Washburn *et al.* (2018) estabelecem comprimentos das faixas de ultrapassagem superiores aos estabelecidos em AASHTO (2018). Para ilustrar essa questão Washburn *et al.* (2018) consideram o comprimento ótimo de 1,2 milha (1,9 km) para a demanda de 400 veic./h, enquanto AASHTO (2018) menciona que faixas de ultrapassagem com comprimento superior a 1 milha (1,6 km) são geralmente indicadas apenas

para segmentos com fluxo superior a 700 veic./hora. Os valores estabelecidos por Washburn *et al.* (2018) encontram-se apresentados no Apêndice A do capítulo 15 (rodovias de pista simples) do HCM (2022).

Em relação ao espaçamento das faixas adicionais, May (1991) sugere a adoção de valores entre 2 e 5 milhas (3,21 a 8,04 km). O autor chegou a esta proposição por meio da análise da sensibilidade dos resultados de simulações em três rodovias distintas, cada uma representativa de um tipo de relevo do terreno (plano, ondulado e montanhoso), utilizando o simulador TRARR, amplamente adotado na Austrália e no Canadá na época de realização do estudo.

Ainda neste assunto, TxDOT (2001) e Wooldridge *et al.* (2002) indicam os valores de referência apresentados na Tabela 9. Tais valores foram obtidos por meio da simulação de diversos cenários no microsimulador TWOPAS, considerando a variação da demanda, do espaçamento entre faixas adicionais (de 1 a 8 mi) e o comprimento das faixas de passagem (de 0,25 a 2 mi). TxDOT (2001) sugere ainda que a duplicação deve ser considerada para volumes superiores a 6.000 veic./dia para relevo plano e 5.000 veic./dia para relevo ondulado.

Tabela 9: Comprimento e espaçamento entre faixas de passagem

Volume de Tráfego VMD (vpd)		Comprimento Recomendado Faixa de Ultrapassagem		Distância Recomendada Entre Faixa de Ultrapassagem	
Relevo Plano	Relevo Ondulado	(mi)	(km)	(mi)	(km)
≤ 1.950	≤ 1.650	0,8 - 1,11	1,3 - 1,8	9,0 - 11,0	14,5 - 17,7
2.800	2.350	0,8 - 1,11	1,3 - 1,8	4,0 - 5,0	6,4 - 8,0
3.150	2.650	1,2 - 1,5	2,0 - 2,4	3,8 - 4,5	6,1 - 7,3
3.550	3.000	1,5 - 2,0	2,4 - 3,2	3,5 - 4,0	5,7 - 6,5

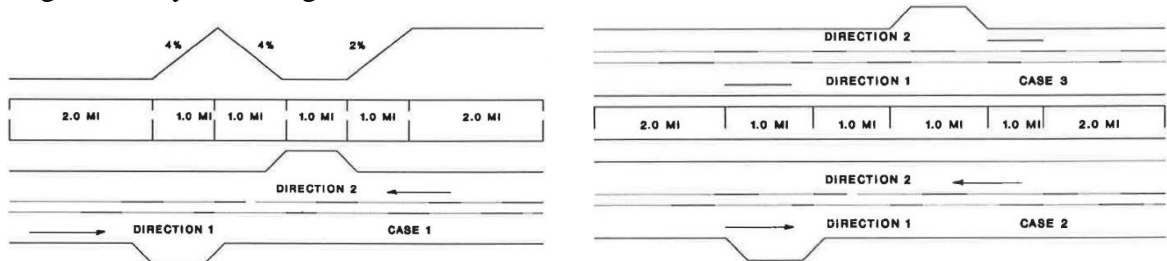
Fonte: TxDOT (2001) e Wooldridge et al. (2002)

Taylor & Jain (1991) conduziram uma pesquisa calibrando o simulador TWOPAS para diferentes condições de tráfego em rodovias no estado de Michigan. O objetivo dos autores foi avaliar os benefícios proporcionados pela implantação de faixas adicionais em rodovias de pista simples incluindo a análise econômica.

Para tanto, foram consideradas duas medidas de desempenho, a redução do atraso e a porcentagem de veículos em pelotão e três volumes de tráfego bidirecionais: i) 5.000 veic./dia (500 veic./h); ii) 8.000 veic./dia (800 veic./h); iii) 10.000 veic./dia (1.000 veic./h). A

participação dos veículos pesados na frota foi igual a 10%. As faixas adicionais consideradas tiveram a extensão de 1 mi (1,609 km). A Figura 4 apresenta as três configurações avaliadas pelos autores: i) *case 1*: duas faixas adicionais (uma em cada sentido); ii) *case 2*: uma faixa adicional (apenas no sentido 1); iii) *case 3*: uma faixa adicional (apenas no sentido 2).

Figura 4: Layout de segmentos rodoviários com faixa adicional considerados no estudo



Fonte: Taylor & Jain (1991)

Jafari & Al-Kaisy (2018) desenvolveram uma pesquisa sobre o comprimento e o espaçamento entre faixas adicionais considerando diferentes combinações desses dois parâmetros. Os autores utilizaram dados de campo obtido em dois locais no estado de Oregon para calibrar e validar o simulador de tráfego adotado no estudo. Os resultados indicaram que espaçamentos entre 5 mi (8 km) e 15 mi (24 km) são mais efetivos.

Austroroads (2021) estabelece diretrizes para implantação faixas de ultrapassagem em rodovias de pista simples, destacando que este tipo de intervenção normalmente é suficiente para postergar a duplicação por alguns anos. O espaçamento proposto varia, entretanto os valores adotados estão entre 3 e 10 km para cada direção.

2.2.1.2 Faixa adicional de subida (terceira faixa)

Conforme TRB (2016), uma faixa de subida (terceira faixa) consiste em uma faixa de ultrapassagem adicionada em uma rampa de subida, possibilitando a ultrapassagem dos veículos pesados que, normalmente, trafegam com velocidades reduzidas nos aclives. As faixas de subida, normalmente, são adicionadas à direita, para atender os veículos lentos, permitindo que veículos mais rápidos realizem as manobras de ultrapassagem na faixa da esquerda.

Valencia-Alaix e Garcia (2016) utilizaram ferramentas de simulação microscópica para comparar os resultados obtidos com a implantação de faixas adicionais em rampas ascendentes considerando o método do HCM e o modelo TWOPAS. Embora tenha sido observado pelos autores que o HCM superestimou a ATS e o PTSF, evidenciando a necessidade

de adaptação do manual para a características da Espanha, os resultados indicaram que as faixas adicionais promoveram melhorias de um ou até dois níveis de serviço se comparado a situação sem projeto. A PTSF foi consideravelmente reduzida, enquanto ATS se manteve estável.

Novamente, Valencia-Alaix & García (2019) desenvolveram um estudo com método similar ao anterior, entretanto dessa vez os autores desenvolveram uma avaliação operacional em terceiras faixas considerando a participação dos veículos pesados com a aplicação do simulador Twopas para rodovias da Colômbia. Os resultados indicaram melhoria na ATS variando de 1,5 a 14,50 km/h com a implantação da terceira faixa. Os benefícios são maiores quando a participação de caminhões na frota também aumenta. Em relação ao PTSF, foram constatadas redução de 9 a 22%, sendo observado que os benefícios foram maiores para rampas suaves com inclinação de 4 a 0% para comprimentos de faixa adicional de até 1,3 km, para aclives mais acentuados de 6 a 8% a faixa adicional deve ser superior a 1,3 km.

Wooldridge *et al.* (2003) descreve alguns problemas comuns identificados com implantação de terceiras faixas em rodovias rurais de pista simples, sob a ótica da geometria, apresentando recomendações para melhoria da segurança viária. Um desses problemas ocorre quando a faixa adicional em uma rampa ascendente termina pouco antes ou exatamente no Ponto de Interseção (PI). Nesses casos, é recomendável que a terceira faixa seja prolongada por até 300 m na rampa descendente, oferecendo uma oportunidade para que os caminhões recuperem parte da sua velocidade antes do fim da faixa adicional. Uma outra questão a ser observada nas rampas ascendentes é a necessidade do projeto da terceira faixa incentivar os veículos mais lentos a utilizar a faixa da direita, caso contrário os condutores dos caminhões podem se relutar em deslocar para a faixa da direita impedindo as ultrapassagens, encorajando comportamentos perigosos dos demais motoristas, podendo potencializar a ocorrência de acidentes. A superfície do pavimento em piores condições que a faixa da esquerda e sinalização inadequada são fatores que podem contribuir para esta questão.

Melo e Setti (2007) determinaram os fluxos mínimos de veículo para os quais torna-se viável a implantação de terceira faixa no Brasil, em função do comprimento e inclinação da rampa ascendente, combinado com o percentual de caminhões e ônibus na composição do tráfego, conforme colocado na Tabela 10.

Tabela 10: Fluxos mínimos de veículos para implantação terceira faixa

		Porcentagem de caminhões na rampa ascendente
--	--	--

Rampa (%)	Comprimento (m)	10%	20%	25%	30%	35%	40%
2,5	500	540	520	480	420	440	450
	1.000	530	500	460	400	420	435
	1.500	510	480	440	385	400	415
	2.000	490	460	420	370	390	405
3	500	490	470	430	390	410	420
	1.000	480	450	410	375	395	405
	1.500	470	430	390	350	370	390
	2.000	450	410	370	340	360	375
4	500	460	440	420	380	390	395
	1.000	440	420	400	365	375	380
	1.500	435	400	380	345	350	365
	2.000	400	380	360	330	340	350
5	500	420	410	400	360	370	370
	1.000	400	375	350	340	345	350
	1.500	400	380	360	340	345	350
	2.000	360	340	320	300	305	310
6	500	400	370	360	350	360	370
	1.000	370	340	340	320	330	350
	1.500	360	340	320	305	315	340
	2.000	330	310	300	290	300	330
7	500	370	340	320	315	315	320
	1.000	340	300	290	280	290	300
	1.500	330	300	290	270	280	290
	2.000	300	275	265	260	275	280
8	500	310	290	270	250	255	260
	1.000	300	280	260	250	255	260
	1.500	300	280	260	240	255	270
	2.000	280	265	250	230	235	245

Fonte: Melo e Setti (2007)

Uma importante constatação dos autores é que o fluxo de veículo mínimo necessário para alcançar a viabilidade com a implantação das faixas adicionais diminuem à medida que a inclinação e o comprimento da rampa aumentam. Por outro lado, com relação à caracterização da demanda, os fluxos mínimos necessários são decrescentes até que os caminhões atinjam a participação de 30% na composição do tráfego, a partir deste percentual, os fluxos de veículos aumentam, pois os benefícios começam a reduzir já que a quantidade de veículos se torna muito pequena para garantir o retorno do investimento.

Polus e Reshetni (1987) concluíram que a implantação de faixa adicional em rampas ascendentes deve priorizar rampas de maior extensão e declividade em detrimento de uma maior quantidade de rampas sucessivas de menor extensão.

2.2.2 Rodovia 2+1

A solução tipo rodovia 2+1 consiste na adaptação da seção transversal na rodovia incluindo uma faixa de tráfego intermediária que muda de direção em intervalos de 1 a 3 km, de acordo com as diretrizes suecas (Bergh *et al.*, 2016).

De acordo com Washburn *et al.* (2018), nos EUA a Rodovia 2+1 possui uma seção transversal contínua de 3 faixas, sendo que a faixa central alterna os segmentos de ultrapassagem entre ambos os sentidos de tráfego, conforme ilustrado na Figura 5.

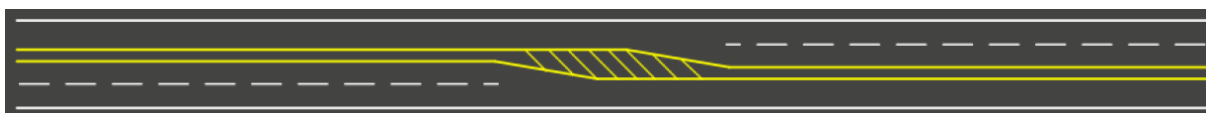
Figura 5: Rodovia 2+1 configuração norte-americana



Fonte: Washburn *et al.* (2018)

As configurações mais modernas utilizadas na Europa incluem uma área de transição entre a inversão de sentido na faixa de passagem, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Rodovia 2+1 configuração europeia



Fonte: Washburn *et al.* (2018)

O projeto de rodovia 2+1 normalmente é implantado em uma extensão considerável, com várias mudanças de direção da faixa de passagem, constituindo uma solução intermediária se comparada a duplicação da via. Esse tipo de projeto, popularmente conhecido como “*Super 2*” é raro nos Estados Unidos, sendo mais comum no Sudoeste. Cabe uma ressalva de que nos EUA o nome “*Super 2*” também é utilizado para segmentos que apresentam faixas de passagem frequente, embora não sejam contínuas (Washburn *et al.*, 2018).

AASHTO (2018) destaca que essa concepção pode ser adequada para rodovias de pista simples quando: i) a demanda não é atendida de forma satisfatória com a implantação de faixas adicionais isoladas, mas também não é suficiente para justificar a duplicação da rodovia; ii) nos casos em que ocorrem restrições ambientais ou econômicas à duplicação. Geralmente uma rodovia 2+1 tende a operar em pelo menos dois níveis de serviço superiores se comparada a condição sem intervenção, em pista simples. Normalmente indicada para terrenos plano ou ondulado, uma rodovia 2+1 não deve ser implantada quando o volume direcional é superior a 1.200 veíc./h, nesses casos geralmente a duplicação é a solução comumente adotada.

Gattis *et al.* (2006) desenvolveram um estudo com foco em rodovias 2+1 em Arkansas (EUA). Foram abordados aspectos como efeitos do comprimento da faixa de passagem no pelotão, velocidade e taxa de acidentes. Foram consideradas como rodovias 2+1 segmentos

com extensão superior a 4,5 km e seções travessais contínuas de três faixas alternando o sentido da faixa de passagem.

Segundo os autores, as rodovias 2 +1 são indicadas como uma alternativa econômica de ampliação de capacidade quando uma rodovia de pista simples não apresenta níveis de mobilidade e segurança desejáveis e os custos de duplicação são proibitivos ou injustificáveis. Os principais benefícios estão relacionados à redução dos pelotões e aumento da segurança. O departamento de transporte de Arkansas implementou a solução 2+1 como alternativa a duplicação para algumas rodovias de pista simples. Os resultados indicaram que quando os veículos entraram na faixa de passagem a redução do percentual de veículos em pelotão diminuiu imediatamente de 48% para 34%. Esse percentual continuou a reduzir ao longo da faixa adicional, embora de forma menos acentuada. Foram observadas redução significativa dos pelotões nos primeiros 1,5 km da faixa de passagem. Para volumes de veículos reduzidos a diminuição do pelotão após essa extensão não se mostrou muito significativa. Para volumes mais elevados o percentual de veículos em pelotão apresentou tendência de estabilização após cerca de 3,0 km.

Dessa forma, os autores constataram maiores benefícios ao longo dos primeiros 1,5 km das faixas adicionais. Entre a extensão de 1,50 e 3,0 km os benefícios foram menos significativos, sendo acumulados à medida que o volume aumentava. O estudo sugere a necessidade de um volume extremamente elevado para adoção de faixas de passagem com comprimento superior a 3,0 km para obtenção de algum benefício extra.

2.2.3 Duplicação

A duplicação de uma rodovia rural de pista simples pode ser definida como a implantação de uma nova faixa, em ambos os sentidos de tráfego, incluindo a restauração da faixa existente, dentro dos limites da faixa de domínio.

Silva (2017) desenvolveu um estudo sobre os benefícios provocados pela duplicação da BR-365 utilizando ferramentas de microssimulação. O autor menciona que, por se tratar de um investimento de grande vulto, a duplicação de uma rodovia necessita de estudos consistentes comprovando sua real necessidade e destaca a ausência de normativos nacionais que disponham de critérios claros e específicos para este fim.

Conforme descrito na seção 2.2, a duplicação é uma das primeiras alternativas a serem avaliadas quando ocorrem problemas operacionais em rodovia de pista simples. Dessa forma, torna-se necessário o estabelecimento de volumes de tráfego característicos de rodovias de pista simples, fornecendo um parâmetro inicial da demanda suportada por esse tipo de rodovia.

2.2.4 Critérios para ampliação de capacidade em rodovias de pista simples

Nesta seção são apresentadas as principais bibliografias relacionadas aos critérios para ampliação de capacidade de rodovias de pista simples. Inicialmente são apresentados estudos em que foram sugeridos volumes horários ou diários como limite para operação de uma rodovia em pista simples. Em seguida serão apresentados trabalhos que de alguma forma avaliaram o processo para tomada de decisão do momento em que uma rodovia de pista simples deve passar por intervenções de ampliação de capacidade.

2.2.4.1 Volume limite para operação de uma rodovia em 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 pc/h em um sentido, com um limite de 3.200 pc/h no total dos 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 rodoviários da Índia é composto por rodovias de pista simples. Os valores obtidos indicaram que a capacidade varia de acordo com a inclinação da rampa. Para valores de rampa entre 2 e 7% a capacidade varia de 2.700 a 1.800 pc/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 PCU/h e 2.900 LVU/h, respectivamente.

Brilon e Weiser (2006) após a realização de pesquisas na Alemanha, incluindo a simulação de trechos rodoviários e observações in loco, consideraram a capacidade 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) e os seguintes parâmetros: aproximadamente 96 km/h para a velocidade de fluxo livre, 12% de participação de veículos comerciais na frota, fator k igual a 0,10, Fator Horário de Pico (FHP) igual a 0,88 e distribuição direcional igual a 60%. De acordo com os resultados apontados pelos autores, para rodovias de classe I do HCM (rodovias onde motoristas esperam viajar em velocidades relativamente altas), a transição do NS “D” para “E” ocorre próximo do volume horário direcional de 750 veh/h (12.500 veic./dia) em segmentos de relevo plano e 690 veh/h (11.500 veic./dia) para segmentos com relevo ondulado (Tabela 11).

Tabela 11: Volume Diário, Volume Horário e Capacidade para Rodovias de Pista Simples

Tipo de Rodovia	Relevo	Volume de Pico Direcional (veic./h)			Volume Médio Diário (Bidirecional)-VMD (veic./dia)		
		NS "A-C"	NS "D"	NS "E" (Capacidade)	NS "A-C"	NS "D"	NS "E" (Capacidade)
I	Plano	440	750	1.490	7.300	12.500	24.900
I	Ondulado	340	690	1.450	5.600	11.500	24.100
II	Ondulado	430	790	1.490	7.100	13.100	24.900

Fonte: Dowling, *et al.* (2016)

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 utilizando o fator k igual a 0,095. Os limites estimados de VMD para cada um dos níveis de serviço em rodovias de pista simples, com velocidade de aproximadamente 88 km/h, são: 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 são: 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 do período de projeto de 20 anos normalmente considerado, adotando o fator k igual a 0,090.

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, buscando contrapor a referência do VMD de 10.000 veic./dia adotado como parâmetro para duplicação. Os autores concluíram que a estimativa de 10.000

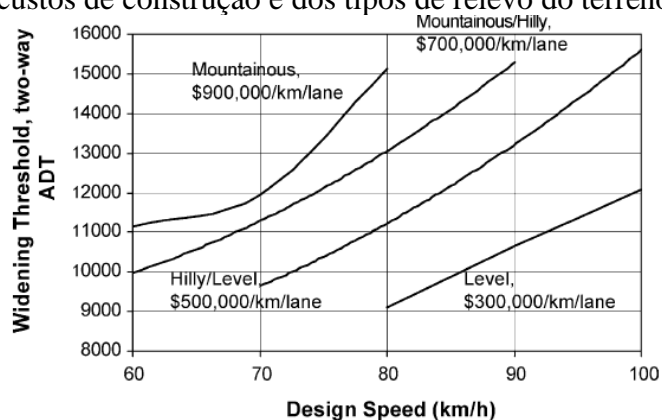
veic/dia é bastante conservadora para as características encontradas em Madri, apresentando como alternativa para segmentos rurais o volume de 15.000 veic/dia, podendo chegar a 18.000 veic/dia quando a participação de veículos comerciais na composição da frota é reduzida, considerando o fator k igual a 0,090.

2.2.4.2 Critérios para ampliação de capacidade em rodovias de pista simples com base em análise econômica

Diferentemente dos trabalhos citados na seção 2.2.4.1, nesta seção são apresentados critérios estabelecidos por autores que incluíram a análise econômica no processo decisório para avaliação da ampliação da capacidade de rodovias de pista simples.

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, de acordo com o relevo do terreno. Os resultados apontaram para indicação de obras de duplicação para rodovias de pista simples com volumes de tráfego diário entre 9 e 12 mil veículos. A Figura 7 apresenta os limites determinados.

Figura 7: Limites de volume de tráfego diário que justificam a ampliação em função dos custos de construção e dos tipos de relevo do terreno



Fonte: Polus e Pollatschek (2004)

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. Neste 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. Para avaliação econômica os autores adotaram a *Lifecycle Cost Analysis* (LCCA), ou análise do custo do ciclo de vida. Foram também analisados aspectos quanto a segurança, por meio da análise da acidentalidade. Os resultados indicaram a necessidade de duplicação 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.

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) sugere 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.

A análise econômica desenvolvida em Taylor & Jain (1991) para avaliar os benefícios proporcionados pela implantação de faixas adicionais foi realizada por meio da relação benefício custo, comparando os benefícios de redução do atraso e índice de acidentes com os custos de implantação e manutenção das faixas adicionais. A redução do atraso foi calculada levando em consideração o atraso médio nas duas direções, sendo também utilizada para estimar a redução do tempo. Foi ainda considerado que os benefícios durante o período de 24 h correspondem a 10 vezes os benefícios estimados na hora de pico.

Os resultados obtidos pelos autores apresentaram variação significativa em função dos valores adotados para o tempo de viagem, uma vez que esse parâmetro é sensível a finalidade da viagem e ao nível de renda dos viajantes, devendo ser atualizado para representas as características locais. As viagens médias, por motivos diversos, tiveram o valor do tempo estimado em \$ 0,36 por hora, enquanto as viagens a trabalho tiveram o valor do tempo estimado em \$ 0,88 por hora.

Para viagens médias, adotando uma inclinação de 4%, a faixa adicional se torna viável a partir de um VMD de 6.500 veic./dia, considerando uma taxa de desconto de 5%. Para uma taxa de desconto de 10% os benefícios superam os custos para um VMD superior a 9.000 veic./dia. Por outro lado, para viagens relacionadas ao motivo trabalho, também adotando uma inclinação de 4%, a faixa adicional se torna viável a partir de um VMD de 4.500 veic./dia, para uma taxa de desconto de 5%. Para uma taxa de desconto de 10% os benefícios superam os custos para um VMD superior a 6.000 veic./dia. Os autores comentam ainda que, para uma rodovia com níveis de serviço moderados, uma faixa adicional isolada pode não trazer benefícios significativos. Entretanto, um conjunto de faixas de adicionais estrategicamente distribuídas pode resultar em redução considerável do tempo de viagem e, conseqüentemente, economia dos custos operacionais.

Melo e Setti (2007) utilizaram ferramenta de microsimulação aliada a análise econômica pela análise benefício-custo (ABC) para a determinação dos fluxos mínimos de veículo para os quais torna-se viável a implantação de faixa adicional em função do comprimento e declividade da rampa ascendente combinado com o percentual de caminhões e ônibus na composição do tráfego. Os autores consideraram como benefício a redução dos custos operacionais dos veículos e dos tempos de viagem, em R\$/ano. Por outro lado, os custos de construção e manutenção ao longo da vida útil de 10 anos resultaram no custo total considerado. Não foram incluídos na análise os benefícios gerados pela redução de acidentes devido à ausência de estudos dessa natureza na época de realização do trabalho.

Segundo Novaes (1982), o estudo conduzido pela Empresa Pública de Pesquisa e Planejamento de Transportes do Estado de São Paulo (TRANSESP), na década de 80, teve como objetivo definir políticas alternativas de transporte no contexto do Sistema de Planejamento de Transporte (SPT) do estado incluindo a análise econômica (benefício-custo). Para tanto, no modo rodoviário, foram consideradas alternativas de ampliação de capacidade para as rodovias existentes, tendo como referência operacional a manutenção do Nível de Serviço “D”. Dessa forma, os trechos do sistema de transporte que apresentaram Nível de Serviço inferior ao “D” foram analisados mais detalhadamente considerando a implantação de terceira faixa para as rodovias de pista simples e faixa adicional para as rodovias de pista dupla. No mesmo trabalho, uma alternativa considerada foi a aceitação da operação no nível de serviço “E”, estudando as mesmas soluções somente quando os segmentos passavam a operar no nível de serviço “F”.

Enquanto a adoção do nível de serviço “D” como limite para ampliação de capacidade resultou na necessidade de implantação de 2.740 km de terceira faixa até 1990, a adoção do nível de serviço “E” como limite reduziu essa extensão para 986 km. A Taxa Interna de Retorno (TIR) no primeiro ano foi de 25,9, considerando o nível de serviço “D” como limite, e 34,80 considerando o nível de serviço “E” como limite. Em contrapartida, os benefícios auferidos para os usuários no primeiro ano foram de 353 Cr\$ x 10⁶ considerando o nível de serviço “D” como limite, e 202 Cr\$ x 10⁶ considerando o nível de serviço “E”.

2.3 Parâmetros de projeto relevantes para intervenções de ampliação de capacidade

DNIT (2006a) indica que parâmetros como o período de projeto e a taxa de crescimento para projeção dos volumes de tráfego constituem aspectos relevantes para a indicação da solução mais atrativa para obras de ampliação de capacidade e, por esse motivo, serão abordados nesta seção.

2.3.1 Período de projeto

DNER (1997) define período de projeto como sendo o período adotado em projeto rodoviário, durante o qual a capacidade da rodovia deveria atender à demanda prevista no projeto. Por outro lado, DNIT (2006b) estabelece entendimentos distintos entre os conceitos de período de projeto e vida útil de projeto, destacando que a vida útil do projeto pode ser diferente do período de projeto considerado para algumas disciplinas, tais como obras-de-arte especiais, pavimentos, drenagem, dentre outros. Dessa forma é possível que ao longo da vida útil do projeto sejam consideradas intervenções com período de projeto menores.

Ainda de acordo com DNIT (2006b) é desejável que o período de projeto seja igual a vida útil do projeto, entretanto, isso não é possível seja pela perda de precisão ou a diferença de vida útil entre os elementos do projeto. Como solução alternativa tem sido usual a adoção do período de projeto de 15 anos, correspondente ao tempo de duração média do pavimento, considerado como elemento de menor vida útil no projeto. Entretanto, como o período de projeto é contado a partir do ano de abertura e, tendo em vista o período de elaboração e análise dos estudos de viabilidade, costuma-se adotar nesses casos o período de projeto de 20 anos.

Mello et al. (2016) desenvolveram uma análise do impacto do período de projeto no custo global de obras rodoviárias determinando que projetos relacionados a pavimentos

flexíveis tenham o horizonte de 20 anos. Cabe destacar que o período de projeto de 20 anos é o mesmo utilizado pelos departamentos de transporte de Illinois, Flórida e Michigan (HIDOT, 2002; FDOT, 2015; MDOT, 2012) para projetos desta natureza.

Como exemplo de publicações que consideram o período de projeto superior a 20 anos, FHWA (2002) adotou o período de projeto de 35 anos para análises LCCA comparando dois projetos investimento de longo prazo com a taxa de desconto de 4%.

2.3.2 Taxa de crescimento

Memmott (1983) destaca que um dos aspectos mais importantes nos modelos de análise econômica de rodovia são as taxas de crescimento adotadas para a projeção dos volumes de tráfego. O autor afirma que o padrão de crescimento adotado tem sido um aspecto relativamente negligenciado na análise econômica dos projetos rodoviários, propondo a utilização de um método de regressão linear múltipla para este fim. As variáveis explicativas incluem o volume de tráfego, o período de projeto, o tipo de intervenção relacionada a ampliação de capacidade e as características locais quanto ao desenvolvimento comercial e industrial.

AASHTO (2010) observa que intervenções de ampliação de capacidade podem afetar as taxas de crescimento de tráfego de uma forma não tão bem conhecida. Ainda de acordo com AASHTO, as taxas de crescimento deveriam ser, quase sempre, uma dimensão da análise de sensibilidade, mas devido ao elevado custo e tempo envolvidos no processo de modelagem, especialmente em uma rede complexa, tal procedimento é raramente efetivado.

DNIT (2006b) afirma que o tráfego evolui normalmente a taxas de crescimento anuais de variação relativamente lenta, destacando que tem sido comum a adoção da taxa de crescimento média anual de 3% ao ano para casos em que não se disponha das informações sobre variáveis econômicas.

2.4 Highway Capacity Manual (HCM)

O *Highway Capacity Manual* é uma das principais referências mundiais para a análise dos níveis de serviço e da capacidade de diversos sistemas viários, dentre eles as rodovias de pista simples. No ano de 2022 foi publicada a 7ª edição do HCM (TRB, 2022), promovendo um novo método para determinação dos níveis de serviço para rodovias de pista simples,

contendo diferenças significativas em relação a edição anterior (TRB, 2016). A versão mais recente do HCM estabelece, dentre outros assuntos: i) um novo método para determinação dos níveis de serviço para rodovias de pista simples; ii) aperfeiçoamento da análise do impacto dos pedestres em interseções controladas por PARE; e, iii) proposição de um método para avaliação do impacto de veículos autônomos em interseções. Nesta seção são abortadas as principais etapas para a determinação dos níveis de serviço para cada uma das edições do manual (HCM, 2016 x HCM, 2022).

Embora diversos autores tenham estudado adaptações 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 de alguma forma que a utilização do HCM sem adaptação tende a subestimar os níveis de serviço, no presente caso optou-se pela utilização dos métodos propostos no HCM sem nenhuma adaptação, tendo em vista o emprego do *Highway Capacity Software - HCS* para a determinação dos níveis de serviço, sem a possibilidade de modificação dos coeficientes das tabelas do HCM.

2.4.1 HCM 2016 (6ª Edição) pista simples

Para a determinação do nível de serviço de rodovias de pista simples o HCM 2016 adota três medidas de desempenho, a saber:

- Velocidade Média de Viagem (VMV), *Average Travel Speed, (ATS)*: reflete a mobilidade em uma rodovia de pista simples, representando a velocidade média no segmento analisado;
- Porcentagem de Tempo Viajando em Pelotões (PTVP), *Percent Time-Spent-Following (PTSF)* representa a liberdade de manobra e o conforto e conveniência da viagem. O PTVP constitui no percentual médio de tempo que os veículos viajam em pelotões, atrás de veículos mais lentos, devido a impossibilidade de ultrapassagem; e ,
- Porcentagem da Velocidade de Fluxo Livre (PVFL), *Percent of free-flow speed (PFFS)*, representa o quão próximo da velocidade regulamentada os veículos são capazes de viajar.

Ainda segundo o HCM 2016 as rodovias de pista simples podem ser agrupadas em três classes:

- *Classe I:* são rodovias onde motoristas esperam viajar em velocidades relativamente altas. Normalmente empregadas em ligações entre municípios, são 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 onde 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 (e não artérias primárias), ou passando por terreno montanhoso. Esse tipo de rodovia geralmente é utilizado por viagens relativamente curtas, nas porções iniciais ou finais de viagens de longa distância.
- *Classe III:* são rodovias que servem áreas moderadamente desenvolvidas. Elas podem representar segmentos de rodovias de Classe I ou Classe II que passam por pequenas vilas ou áreas recreativas desenvolvidas. O tráfego local em geral se mistura com o tráfego de longa distância, apresentando valores elevados para densidade de acessos em nível. Esse tipo de rodovia comumente apresenta velocidade regulamentada reduzida, refletindo um nível maior de atividade.

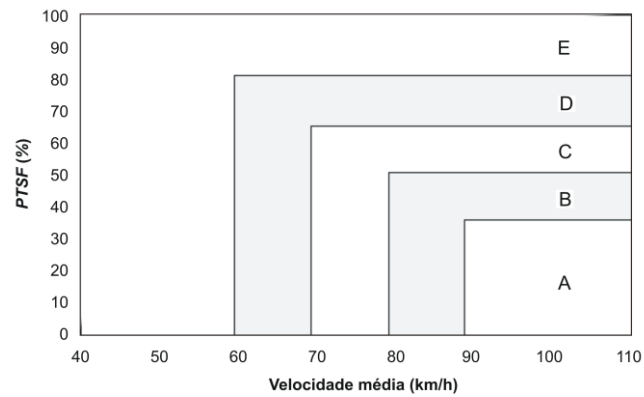
Nesse trabalho, serão consideradas apenas rodovias de Classe I, para as quais o nível de serviço é determinado em função de duas medidas de serviço (que são medidas de desempenho usadas para calcular o nível de serviço): i) Average Travel Speed, (ATS); ii) Percent Time-Spent-Following (PTSF). Os critérios para a determinação do nível de serviço das rodovias de Classe I e II está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Critérios para determinação do NS em rodovia de pista simples de classe I e II

Rodovias de classe I HCM-2016			Rodovias de classe II HCM-2016	
NS	PTSF (%)	ATS (km/h)	NS	PTSF (%)
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

Fonte: Adaptado TRB(2016).

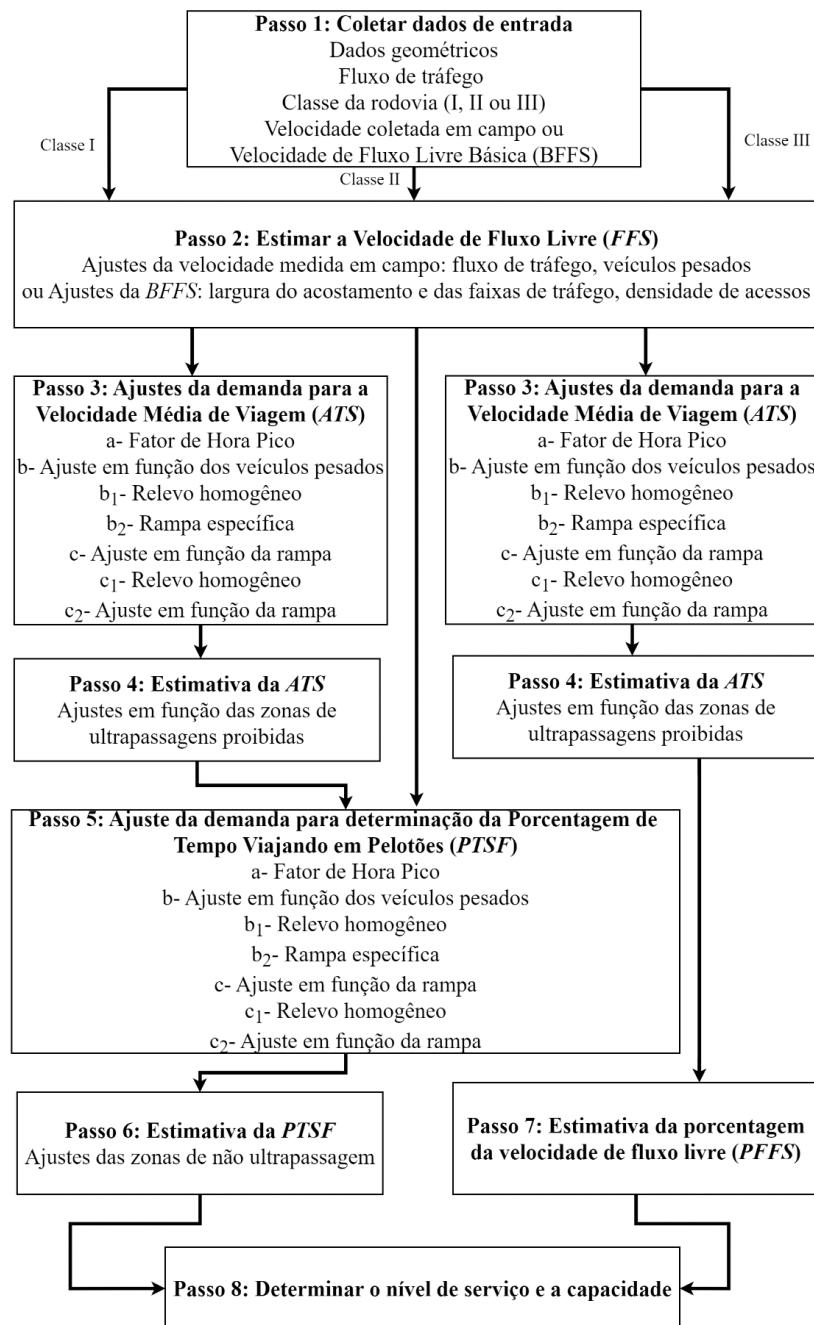
Figura 8: Critério para determinação do NS em rodovias de pista simples de classe I



Fonte: Adaptado TRB (2016)

A Figura 9 apresenta o fluxograma do método para a determinação do nível de serviço das rodovias em pista simples conforme preconiza o HCM2016. Em seguida são apresentadas as principais equações para a determinação dos níveis de serviço. A análise dos segmentos direcionais pode ser realizada para três diferentes tipos de segmentos, com relevo plano, ondulado, ou com rampas específicas.

Figura 9: Fluxograma método HCM2016 pista simples



Segundo o HCM2016 a determinação da FFS pode ser feita adotando a velocidade de projeto da rodovia ou utilizando a velocidade regulamentada como base + 16 km/h (10 mi/h), conforme apresentado na equação (1).

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A, \quad (1)$$

Em que:

- $BFFS$: velocidade de fluxo livre básica, entre 70 e 110 km/h;
- f_{LS} : fator de ajuste para a largura da faixa e do acostamento; e
- f_A : fator de ajuste para a densidade de pontos de acessos.

Em seguida determina-se o fluxo de tráfego (v_p) na direção analisada e na direção oposta, conforme apresentado na equação (2), tanto para a ATS_d quanto para a $PTSF_d$. Na equação (3) é possível observar que a formulação proposta é sensível a proporção de caminhões e ônibus na corrente de tráfego.

$$v_p = \frac{V}{PHF \cdot f_G \cdot f_{HV}} \quad (2)$$

Em que:

- V : volume horário na direção analisada (veic/h);
- PHF : fator de hora pico;
- f_G : fator de ajuste para rampas; e,
- f_{HV} : fator de ajuste para veículos pesados, calculado pela equação (3).

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1)} \quad (3)$$

Em que:

- P_T : proporção de caminhões e ônibus na corrente de tráfego;
- P_R : proporção de veículos recreacionais na corrente de tráfego;
- E_T : equivalente veicular para os caminhões e ônibus; e
- E_R : equivalente veicular para os veículos recreacionais.

Por fim as equações (4) e (5) apresentam as equações para a determinação da velocidade média para a direção analisada (ATS_d) e a porcentagem de tempo viajando em pelotões para a direção analisada ($PTSF_d$).

$$ATS_d = FFS - 0,0125 \cdot (v_d + v_o) - f_{np,ATS} \quad (4)$$

Em que:

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

- FFS : velocidade no fluxo livre (km/h);
- $f_{np,ATS}$: fator de ajuste em razão da presença de zonas de ultrapassagens proibidas;
- v_d : fluxo de tráfego na direção analisada, dado em carros de passeio equivalente (cp/h); e
- v_o : fluxo de tráfego na direção oposta (cp/h).

	$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \left(\frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right)$	(5)
--	--	-----

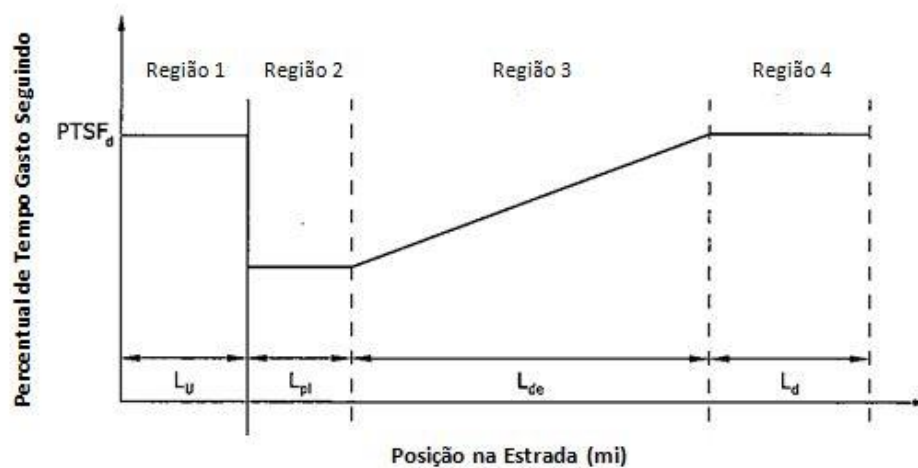
Em que:

- $BPTSF_d$: $PTSF$ 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 $PTSF_d$ (cp/h); e,
- $v_{o,PTSF}$: fluxo de tráfego na direção oposta para estimação da $PTSF_d$ (cp/h).

Segundo o HCM 2016, para conduzir um estudo de verificação da necessidade de implantação de uma faixa de ultrapassagem, a primeira etapa consiste na análise do segmento sem a implantação da faixa de ultrapassagem. A segunda etapa consiste na divisão do segmento analisado em quatro regiões (L_u , L , L_{de} e L_d), a terceira etapa na determinação do $PTSF$, a quarta etapa na determinação da ATS e a quinta etapa na determinação do nível de serviço. As regiões consideradas na segunda etapa encontram-se descritas, a seguir, conforme ilustrado na Figura 10:

1. Comprimento a montante da faixa de ultrapassagem L_u , ou seja, antes da faixa de ultrapassagem,
2. Comprimento da faixa de ultrapassagem L_{pl} ,
3. Comprimento a jusante da de ultrapassagem dentro dos limites do comprimento efetivo L_{de} , ou seja, onde ainda existe algum efeito da faixa de ultrapassagem nas medidas de desempenho, e
4. Comprimento a jusante da faixa de ultrapassagem após do seu comprimento efetivo L_d , ou seja, após os efeitos da faixa de ultrapassagem terem cessado.

Figura 10: Regiões da faixa de ultrapassagem



Fonte: Adaptado TRB (2016)

As faixas adicionais de subida (terceiras faixas) normalmente são indicadas quando atingidos os seguintes parâmetros (TRB, 2016; AASHTO 2018):

1. A taxa de fluxo direcional na rampa de subida excede 200 veí/h;
2. A taxa de fluxo direcional de caminhões na rampa de subida excede 20 veí/h; e
3. Quaisquer 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 / F; ou;
 - c. O nível de serviço na rampa é dois ou mais níveis inferiores ao nível de serviço no segmento adjacente (a montante).

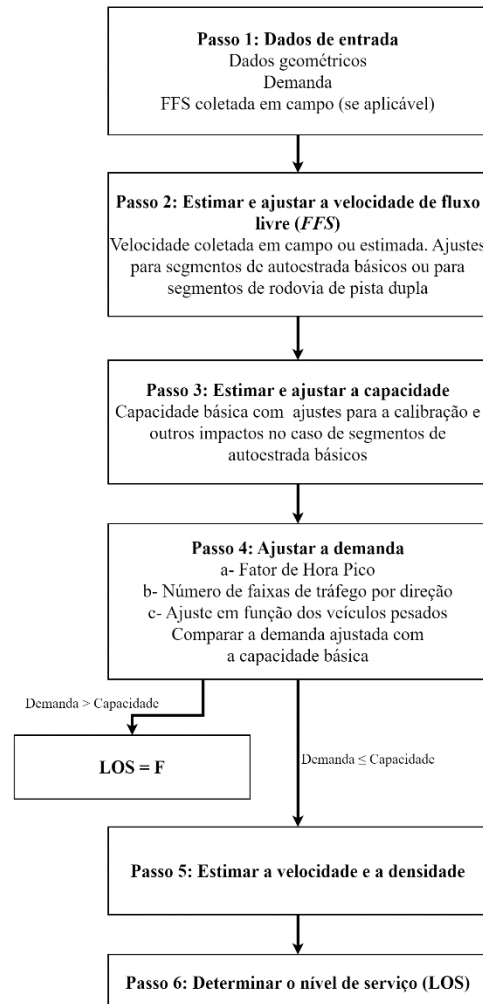
A análise operacional do nível de serviço nas terceiras faixas é desenvolvida com os mesmos parâmetros e procedimentos das faixas de ultrapassagem em terreno plano ou ondulado, com diferenças na utilização dos fatores de ajuste de greide além de estabelecer as distâncias L_u e L_d iguais a 0 (TRB, 2016).

2.4.2 HCM 2016 (6ª Edição) pista dupla (múltiplas faixas)

O método para a determinação dos níveis de serviço em pista dupla (múltiplas faixas) na 6ª edição do HCM sofreu apenas duas modificação na 7ª edição (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}). Por esse motivo será apresentado nesta seção apenas o fluxograma das etapas para a determinação dos níveis de serviço em rodovias de pista dupla e as equações (6) a (8) demonstrando as principais formulações do método.

Figura 11: Fluxograma método HCM2016 e HCM202 pista dupla



Fonte: Adaptado TRB (2016)

Segundo o HCM2016 a determinação da FFS para rodovias de pista dupla pode ser feita adotando a velocidade regulamentada como base acrescida de 8 km/h (5 mi/h) para velocidade regulamentada superior a 80 km/h (50 mi/h) ou acrescida de 12 km/h (7 mi/h) para velocidade regulamentada inferior a 80 km/h (50 mi/h), conforme apresentado na equação (6).

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A \quad (6)$$

Em que:

- FFS: velocidade de fluxo livre;

- $BFFS$: velocidade de fluxo livre básica;
- f_{LW} : fator de ajuste para a largura da faixa;
- f_{LC} : fator de ajuste para a distância lateral livre de obstáculos;
- f_M : fator de ajuste para a divisão física da pista;
- f_A : fator de ajuste para o número de acessos ao longo da rodovia;

Em seguida determina-se o fluxo de tráfego (v_p), conforme apresentado na equação (7).

$$v_p = \frac{V}{PHF \cdot N \cdot f_{HV} \cdot f_p} \quad (7)$$

Em que:

- V : volume de tráfego por sentido;
- PHF : fator de hora pico;
- N : número de faixas por sentido;
- f_{HV} : fator de ajuste para veículos pesados; e,
- f_p : = fator de familiaridade dos motoristas com a rodovia.

$$D = \frac{v_p}{S} \quad (8)$$

Em que:

- D : densidade;
- v_p : fluxo de tráfego; e
- S : velocidade média de viagem dos automóveis.

2.4.3 HCM 2022 (7ª Edição)

A determinação dos níveis de serviço para as rodovias de pista simples no HCM 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). As rodovias podem ser classificadas em duas classes, rodovias de alta velocidade e rodovias de baixa velocidade, a saber:

- *Rodovias de alta velocidade*: são rodovias que possuem velocidade regulamentada maior ou igual a 50 mi/h (80,46 km/h), a velocidade e o atraso devido às restrições de passagem são importantes para os motoristas. As rodovias de duas faixas de maior velocidade são mais comumente encontradas como vias que promovem a ligação entre cidades.
- *Rodovias de baixa velocidade*: são rodovias onde a velocidade regulamentada é menor que 50 mi/h (80,46 km/h), 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 13 apresenta os critérios para determinação do nível de serviço baseado na FD.

Tabela 13: Critérios para determinação do nível de serviço com base na FD (HCM 2022)

Nível de Serviço	<i>Follower Density (FD)</i>			
	(Rodovias de alta velocidade)		(Rodovias de baixa velocidade)	
	Velocidade Regulamentada ≥ 80 mi/h (veh/mi/lane)	Velocidade Regulamentada $\geq 80,46$ km/h (veh/km/faixa)	Velocidade Regulamentada < 80 mi/h (veh/mi/lane)	Velocidade Regulamentada $< 80,46$ km/h (veh/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	$> 24,14$

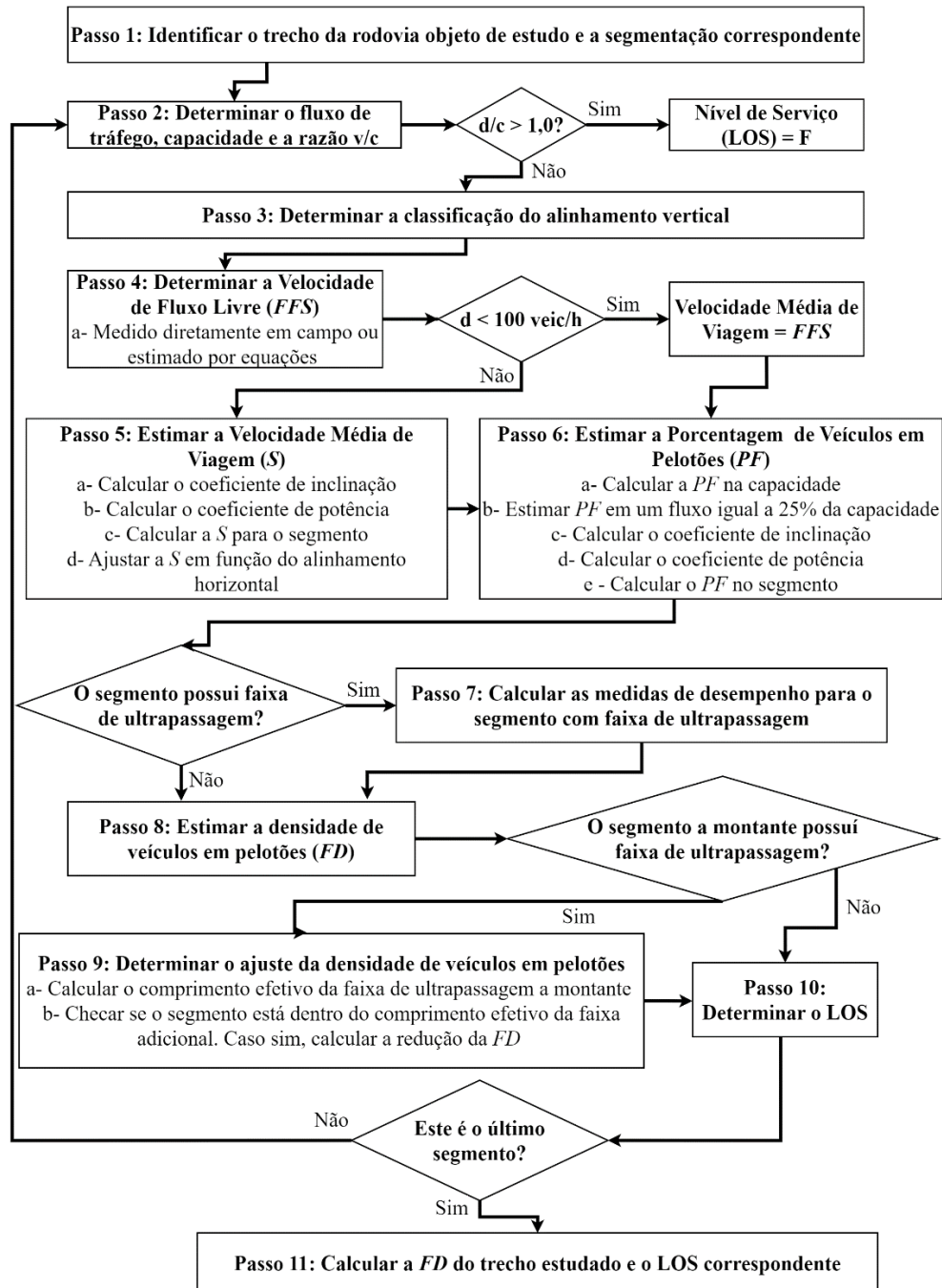
Fonte: Adaptado TRB (2022)

Da Tabela 13 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 regulamentada 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, conforme demonstrado adiante no capítulo 5. Embora ambas as classes de rodovia apresentadas na Tabela 13 possuam faixas de densidade similares, as rodovias de baixa velocidade aceitam valores maiores de FD pela expectativa dos motoristas de não desenvolverem altas velocidades.

A Figura 12 apresenta o fluxograma do método para a determinação dos níveis de serviço para rodovias de pista simples considerando os preceitos do HCM 2022. A Figura 13, apresenta o fluxograma para análise das curvas horizontais no passo 5 (estimar a velocidade

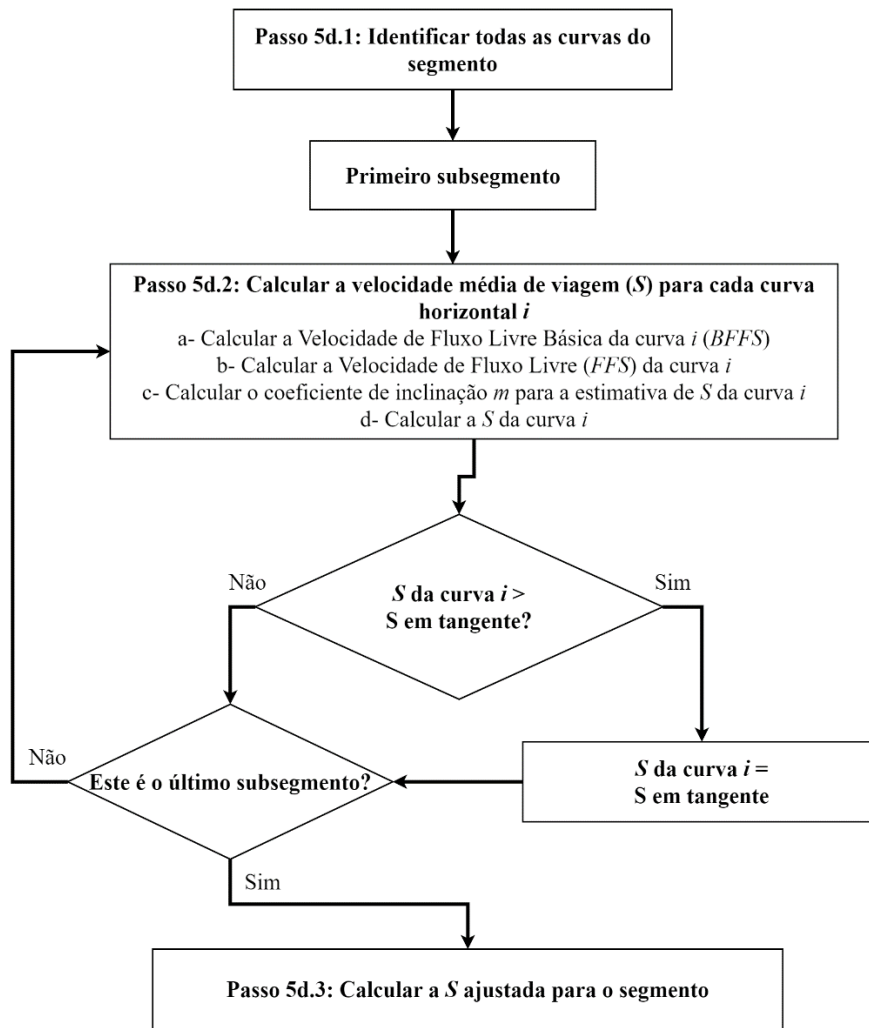
média S). No HCM 2022 todas as curvas horizontais devem ser analisadas individualmente para que a partir da análise dos valores do raio e da superelevação seja possível quantificar um eventual impacto na velocidade em tangente.

Figura 12: Fluxograma método HCM2022 pista simples



Fonte: Adaptado TRB (2022)

Figura 13: Fluxograma método HCM2022 pista simples (análise curva horizontal)



Fonte: Adaptado TRB (2022)

A primeira etapa do método preconizado pelo HCM 2022 corresponde a identificação do tipo de segmento que compõe o trecho objeto de estudo, a saber: i) com restrição de ultrapassagem; ii) sem restrição de ultrapassagem; ou iii) com faixas adicionais. Em seguida, o fluxo direcional (v_i) na direção analisada é determinado com a formulação apresentada na equação (9). O volume direcional (v_i) é determinado sem a influência do fator de ajuste para veículos pesados como no HCM 2016. A FFS é determinada pela equação (10), com base no coeficiente angular da relação linear entre FFS e HV, calculado pela equação (11). A FD é calculada pela equação (12), combinando os valores de três medidas de desempenho, velocidade média de viagem, a porcentagem de veículos em pelotões e o fluxo de veículos que trafegam no sentido analisado.

$$v_i = \frac{V_i}{PHF} \quad (9)$$

Em que:

- V_i : volume horário na direção analisada (veic/h);
- PHF : fator de hora pico;

$$FFS = BFFS - a \times HV \quad (10)$$

Em que:

- FFS : velocidade de fluxo livre (mi/h);
- $BFFS$: velocidade de fluxo livre base (mi/h);
- a : coeficiente angular da relação linear entre FFS e HV, calculado pela equação (11);
- HV : porcentagem de veículos pesados (%);

$$a = \text{Máx} \left[0.0333, a_0 + a_1 \times BFFS + a_2 \times L + \text{Máx} \left(0, (a_3 + a_4 \times BFFS + a_5 \times L) \times \frac{v_o}{1,000} \right) \right] \quad (11)$$

Em que:

- $a_0 - a_5$, = coeficientes de ajuste;
- L = comprimento do segmento (mi);
- v_o = fluxo de veículos no sentido oposto ao de análise (veic/h).

$$FD = \frac{PF}{100} \times \frac{v_d}{ATS} \quad (12)$$

Em que:

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

A equação (10), utilizada para a determinação da FFS no HCM 2022 possui a variável HV (porcentagem de veículos pesados), multiplicada pelo coeficiente a , determinado pela equação (11). Ocorre que na formulação do coeficiente a as variáveis possuem valores absolutos reduzidos, a saber: os valores de a_0 variam de -0,45036 a -0,38360; a_1 variam de 0,008140 a 0,01074; a_2 variam de 0,01543 a 0,01945; a_3 variam de -0,69848 a 0,01358; a_4

variam de 0,00000 a 0,01069; a_5 variam de 0,0000 a 0,12700, além da constante igual a 0,0333. Da mesma forma, o valor absoluto do coeficiente a que multiplica a porcentagem de veículos pesados (HV), é extremamente reduzido, fazendo com que o método proposto pelo HCM 2022 não seja sensível a variações da porcentagem de veículos pesados (HV), ao contrário do HCM 2016.

Segundo o HCM 2022 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.

2.4.4 HCM 2016 x HCM 2022

A primeira diferença ao se comparar os métodos do HCM 2022 com o HCM 2016 para determinação dos níveis de serviço em rodovias de pista simples está nas medidas de desempenho. Enquanto o nível de serviço no HCM 2016 é determinado em função da *Average Travel Speed*, (ATS) e *Percent Time-Spent-Following* ($PTSF$), no HCM 2022 o nível de serviço é determinado por meio da *Follower Density* (FD).

No HCM 2022 não há a classificação do segmento homogêneo entre rodovias de classe I, II, e II, apenas diferenciação entre rodovias de alta velocidade ou baixa velocidade para definição da tabela de consulta para determinação da FD ou a subdivisão dos segmentos em subsegmentos em curva, afetando a velocidade média final. Os dados de entrada para cálculo dos níveis de serviço também foram modificados, parâmetros como a porcentagem de zonas de ultrapassagem proibida não são mais necessários, em contrapartida cada uma das curvas verticais é analisada separadamente, recebendo uma classificação de 1 a 5, baseada na inclinação e no comprimento da rampa, ocasionando uma redução da velocidade de fluxo livre, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14: Redução da velocidade de fluxo livre em função da classificação dos alinhamentos verticais e horizontais

Classificação	Redução da Velocidade (mi/h)	Redução da Velocidade (km/h)
1	< 7	< 11,26
2	≥ 7 < 14	≥ 11,26 < 22,53
3	≥ 14 < 21	≥ 22,53 < 33,80
4	≥ 21 < 28	≥ 33,80 < 45,06
5	≥ 28	≥ 45,06

Fonte: Adaptado TRB(2022).

A classificação do segmento entre plano, ondulado ou montanhoso não é mais necessária, tendo em vista que as rampas são avaliadas individualmente. A classificação dos segmentos passa a levar em consideração a Linha de Divisão de Fluxos Opostos (LFO), resultando em três tipos de segmento, a saber: i) com restrição de ultrapassagem; ii) sem restrição de ultrapassagem; ou iii) com faixas adicionais. Essa proposta resulta em um número de segmentos homogêneos consideravelmente maior com a aplicação do HCM 2022 se comparado ao HCM 2016, tendo em vista que a LFO altera de forma muito mais frequente ao longo do segmento de uma rodovia que o relevo. Esse assunto é abordado com maior detalhe no capítulo 4.

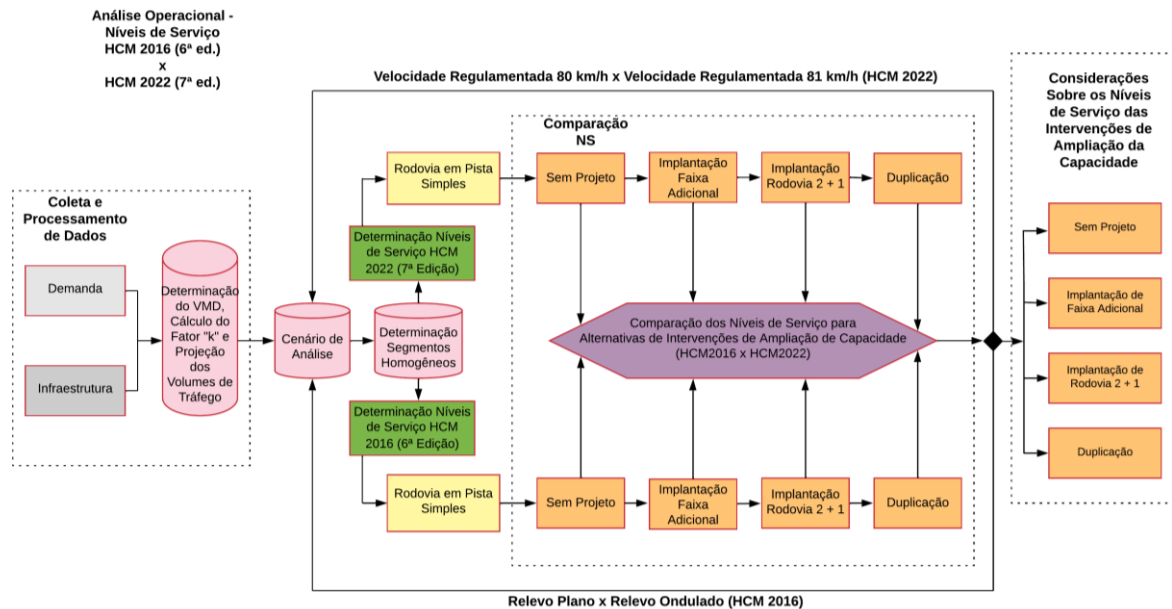
Além destes aspectos, a formulação para a determinação da FFS no HCM 2022 foi alterada, fazendo com que o impacto dos veículos pesados não seja mensurado pelos equivalentes veiculares, como no HCM 2016, passando a ser determinado por meio da multiplicação da porcentagem de veículos pesados pelo coeficiente a , tornando o novo método pouco sensível a variações da participação do tráfego comercial. Da mesma forma a abordagem para a determinação dos níveis de serviço em segmentos de faixa adicional também é distinta da edição anterior, sobretudo em função da implementação da FD como medida de desempenho.

Conforme mencionado anteriormente na seção 2.4.2, em relação ao método de determinação dos níveis de serviço para rodovias de pista dupla, as únicas alterações do HCM 2016 para o HCM 2022 foram a) a retirada do fator de familiaridade dos motoristas com a rodovia (f_p) na determinação do fluxo de tráfego (v_p) e 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}).

3 MÉTODO

Neste capítulo, são tratados aspectos referentes ao método proposto para elaboração deste trabalho, que é composto por três etapas, conforme apresentado na Figura 14. A primeira delas (seção 3.1) consiste na coleta e tratamento dos dados, incluindo o processamento das informações relacionadas à demanda e infraestrutura (geometria). A segunda etapa (seção 3.2) 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 2016 e HCM 2022 para avaliação das intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples. A terceira etapa (subitem 3.3) consiste nas considerações sobre as obras de ampliação de capacidade para rodovias de pista simples.

Figura 14: Fluxograma do método



Fonte: O autor

3.1 Coleta e processamento de dados

Para o desenvolvimento do presente trabalho, 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.

As informações de infraestrutura (geometria) foram fornecidas pela concessionária Rota do Oeste, 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 ANTT <<https://dados.antt.gov.br/group/rodovias>>. O trecho experimental possui uma praça de pedágio, 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. Os volumes de tráfego determinados, assim como todas as demais informações consideradas para o desenvolvimento deste trabalho, foram do ano de 2019, ou seja, antes do início da pandemia provocada pelo coronavírus. Posteriormente o volume foi projetado para o ano de 2022, considerado como ano 0 do horizonte de projeto, resultado em um VMD de 6.352 veic./dia.

Para a determinação do fator horário de projeto K, os volumes de tráfego foram processados utilizando o período de agregação horário, para aplicação do método de análise da curva da enésima hora, resultando no fator K igual 0,91 para o sentido Norte e 0,84 para o Sentido Sul, ambos considerando o critério da 50ª hora de projeto (ANTT, 2007; ANTT, 2017; DER/SP, 2018). Em seguida, foi determinado o volume horário de análise para ambos os sentidos de tráfego, 322 veic./hora para o sentido norte e 304 veic./hora 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 de 50 anos (2072).

O período de projeto de 50 anos não é comumente utilizado para intervenções de ampliação de capacidade, conforme colocado na seção 2.3.1. Entretanto, como apresentado oportunamente na seção 5.3, o método do HCM 2022 apresenta uma significativa melhora nos níveis de serviço se comparado ao método do HCM 2016, atingindo o nível de serviço “F” apenas no 50º ano considerando o cenário sem projeto.

3.2 Análise operacional das intervenções de ampliação de capacidade

A primeira etapa da análise operacional consiste na determinação dos cenários das intervenções de ampliação de capacidade, considerando os métodos e particularidades do HCM 2016 e HCM 2022. Basicamente, foram avaliadas quatro situações distintas: i) sem projeto; ii) faixa adicional; iii) rodovia 2+1; iv) duplicação. Entrando, conforme mencionado nas seções 2.1.2 e 2.1.3, a definição entre o relevo plano e ondulado no HCM 2016 é uma etapa

controversa. Buscando dirimir dúvidas nesse sentido, optou-se por determinar os níveis de serviço para o HCM 2016 em um cenário considerando o relevo plano e em outro cenário considerando o relevo ondulado. Da mesma forma, no HCM 2022 a definição entre a classe da rodovia para o cálculo da FD é determinada com base na velocidade de 50 mi/h (80,46 km/h), conforme discutido na seção 2.4.3. Portanto, embora pela 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, também buscando dirimir dúvidas nesse sentido, optou-se por determinar os níveis de serviço para o HCM 2022 em um cenário considerando a velocidade regulamentada de 80 km/h (49,7 mi/h) e em outro cenário considerando a velocidade regulamentada de 81 km/h (50,3 mi/h). Dessa forma, foi possível verificar na etapa de avaliação dos resultados o impacto de cada uma dessas opções. A Tabela 15 apresenta os cenários de análise considerados.

Tabela 15: Cenários de análise

Cenário	Intervenção	Versão HCM	Parâmetros
1	sem projeto	HCM 2022	velocidade regulamentada 80 km/h
2	faixa adicional		
3	rodovia 2+1		
4	duplicação		
5	sem projeto	HCM 2022	velocidade regulamentada 81 km/h
6	faixa adicional		
7	rodovia 2+1		
8	duplicação		
9	sem projeto	HCM 2016	relevo plano
10	faixa adicional		
11	rodovia 2+1		
12	duplicação		
13	sem projeto	HCM 2016	relevo ondulado
14	faixa adicional		
15	rodovia 2+1		
16	duplicação		

Fonte: O autor

O cenário sem projeto foi adotado neste trabalho, pois não se cogita abandonar o serviço ofertado e, sim, apenas a sua ampliação. Ou seja, os segmentos continuarão operando em pista simples caso não seja implementada nenhuma melhoria.

A demanda de tráfego é a mesma para todos os cenários de análise, tendo em vista que não se considerou uma eventual parcela de tráfego gerada 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

2016 com o HCM 2022, possibilitando o posicionamento das faixas adicionais nos mesmos locais, de acordo com os critérios do HCM 2022 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 50ª hora no NS “E” (TCU, 2016), ou seja, sempre que ocorre a operação no nível de serviço “E” na 50ª 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 50ª hora, a rodovia será duplicada.

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, menor distância recomendada por Austroads (2021), e a extensão das faixas adicionais projetadas 1,60 km, maior distância recomendada por AAHSTO (2018) para fluxos direcionais entre 400 e 700 veic./h como no segmento em estudo no 10º ano de projeto.

Essas premissas, menor espaçamento e maior extensão, foram adotadas tendo em vista a participação do tráfego comercial de aproximadamente 75% no trecho experimental, os estudos relacionados com espaçamento ou comprimento das faixas adicionais, como: Austroads (2021); Jafari & Al-Kaisy (2018); Wooldridge *et al.* (2002); TxDOT (2001); May (1991), 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), a exemplo de Bloomberg (2010), sem nenhuma adaptação para as condições nacionais, tendo em vista a impossibilidade de modificação dos coeficientes das tabelas do HCM no software HCS. Produzido e comercializado pela McTrans, o HCS possui módulos específicos com rotinas que realizam o cálculo dos níveis de serviço de acordo com os métodos propostos no HCM 2016 e HCM 2022.

Portanto, a indicação das obras de ampliação de capacidade foi realizada de forma individual, para cada segmento, facilitando 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”.

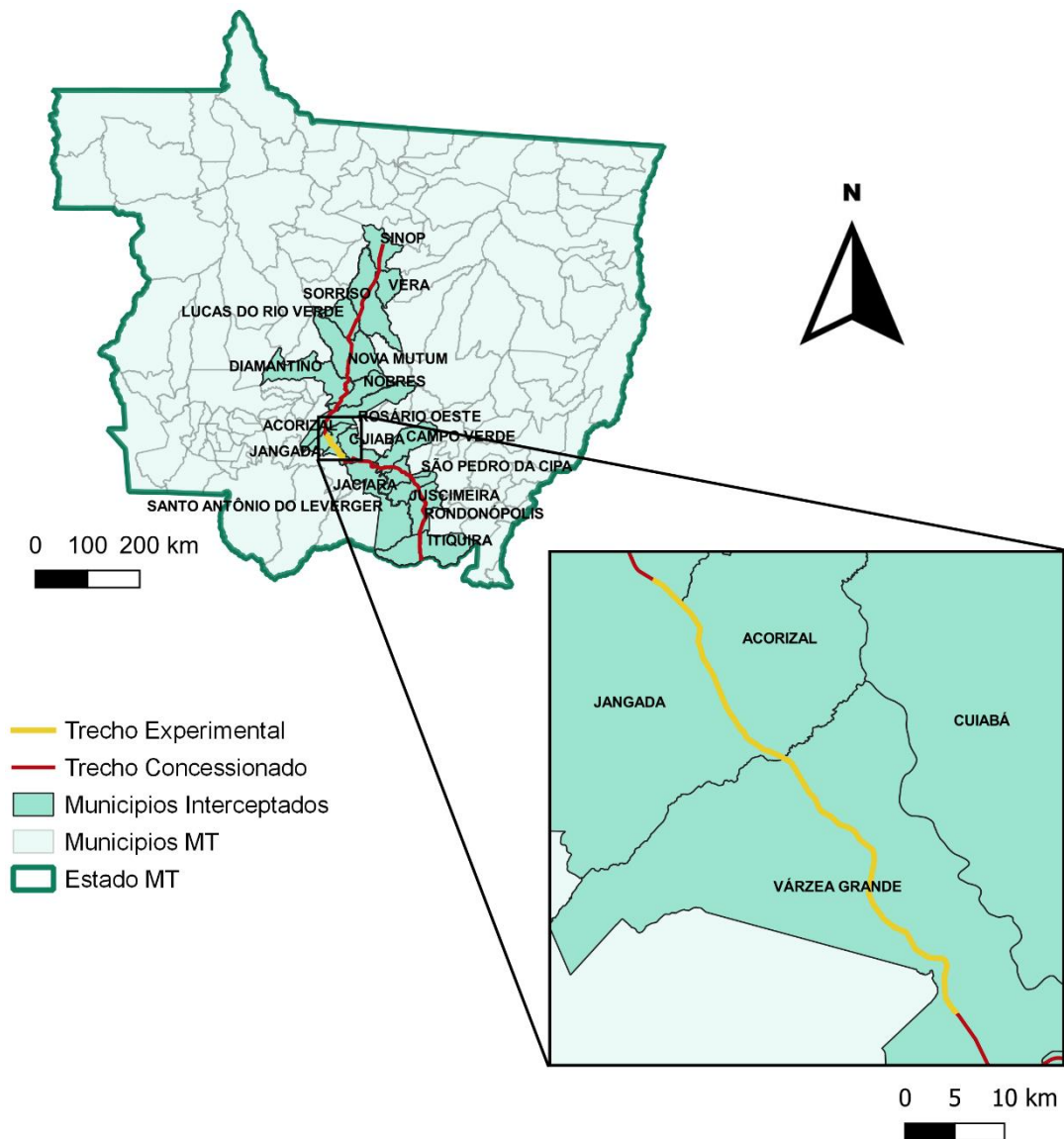
3.3 Comparação dos níveis de serviço HCM 2016 x HCM 2022

A partir dos resultados obtidos, foi possível avaliar a vida útil das intervenções de ampliação da capacidade, tomando como base as características do trecho experimental, assim como avaliar o impacto da utilização do HCM 2022 para determinação dos níveis de serviço de rodovias de pista simples, comparando com os resultados obtidos por meio do HCM 2016, conforme apresentado no capítulo 5.

4 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/MT, compreendido entre o km 358,52 (Várzea Grande/MT) e o km 406,89 (Jangada/MT), sob concessão da Rota do Oeste, utilizado para aplicação do método proposto, conforme representado na Figura 15.

Figura 15: Trecho experimental



Fonte: O autor

Em relação as informações infraestrutura o método do HCM 2022 necessita de dados de entrada bastante específicos, tais como inclinação de cada rampa vertical, raio e superelevação de cada curva horizontal, segmentos de ultrapassagem proibida, permitida, relação de faixas adicionais existentes.

Ao longo do trecho experimental foram cadastradas 105 rampas verticais distintas, conforme apresentado na Tabela 16. Com o intuito de reduzir o número de rampas e consequentemente o número de segmentos homogêneos adotou-se um critério para agrupamento das rampas verticais, conforme descrito adiante nesta seção.

Tabela 16: Rampas verticais trecho experimental

km Inicial (BR-163)	km Final (BR-163)	Extensão (km)	Inclinação (%)	Active/ Declive
354,525	355,121	0,596	-0,800	Declive
355,121	355,832	0,711	-2,000	Declive
355,832	356,282	0,450	-0,400	Declive
356,282	356,776	0,494	1,200	Active
356,776	357,502	0,726	-4,500	Declive
357,502	357,870	0,368	1,300	Active
357,870	358,395	0,525	-2,750	Declive
358,395	359,226	0,831	-0,200	Declive
359,226	359,883	0,657	2,100	Active
359,883	360,349	0,466	0,100	Active
360,349	361,146	0,797	2,250	Active
361,146	361,829	0,683	1,400	Active
361,829	362,280	0,451	-2,900	Declive
362,280	362,664	0,384	2,500	Active
362,664	363,191	0,527	1,400	Active
363,191	363,518	0,327	-1,150	Declive
363,518	363,706	0,188	1,400	Active
363,706	363,925	0,219	-2,000	Declive
363,925	364,384	0,459	4,500	Active
364,384	364,718	0,334	-3,000	Declive
364,718	365,293	0,575	1,000	Active
365,293	365,682	0,389	-0,100	Declive
365,682	366,043	0,361	1,900	Active
366,043	366,570	0,527	-1,900	Declive
366,570	367,402	0,832	-0,250	Declive
367,402	369,173	1,771	0,900	Active
369,173	370,044	0,871	-0,450	Declive
370,044	370,607	0,563	0,800	Active
370,607	371,170	0,563	-0,500	Declive
371,170	371,651	0,481	-4,400	Declive
371,651	371,976	0,325	2,600	Active
371,976	372,286	0,310	-2,600	Declive
372,286	372,549	0,263	3,700	Active
372,549	372,744	0,195	-2,500	Declive
372,744	373,166	0,422	1,400	Active
373,166	373,547	0,381	-0,300	Declive
373,547	373,830	0,283	-3,000	Declive
373,830	374,175	0,345	1,300	Active
374,175	374,548	0,373	-0,500	Declive
374,548	374,879	0,331	1,900	Active
374,879	375,323	0,444	1,300	Active
375,323	375,692	0,369	-3,300	Declive
375,692	376,028	0,336	-2,000	Declive
376,028	376,943	0,915	-1,100	Declive
376,943	377,423	0,480	-4,700	Declive
377,423	377,775	0,352	0,100	Active

377,775	378,356	0,581	2,700	Active
378,356	379,000	0,644	1,000	Active
379,000	379,381	0,381	-1,500	Declive
379,381	379,602	0,221	1,500	Active
379,602	381,401	1,799	0,600	Active
381,401	381,930	0,529	-1,400	Declive
381,930	382,171	0,241	-2,700	Declive
382,171	382,719	0,548	0,500	Active
382,719	383,054	0,335	-2,900	Declive
383,054	383,384	0,330	3,000	Active
383,384	384,302	0,918	0,450	Active
384,302	384,557	0,255	2,200	Active
384,557	385,108	0,551	0,800	Active
385,108	385,632	0,524	0,000	Active
385,632	385,943	0,311	-1,800	Declive
385,943	386,261	0,318	0,200	Active
386,261	386,935	0,674	2,400	Active
386,935	387,541	0,606	-3,100	Declive
387,541	387,942	0,401	-3,800	Declive
387,942	388,361	0,419	0,050	Active
388,361	388,825	0,464	4,100	Active
388,825	389,210	0,385	0,300	Active
389,210	389,670	0,460	1,200	Active
389,670	390,052	0,382	-3,400	Declive
390,052	390,592	0,540	2,000	Active
390,592	391,071	0,479	-0,700	Declive
391,071	391,558	0,487	1,950	Active
391,558	392,229	0,671	2,500	Active
392,229	392,540	0,311	-3,000	Declive
392,540	393,082	0,542	-1,900	Declive
393,082	393,424	0,342	-5,000	Declive
393,424	394,021	0,597	5,200	Active
394,021	394,320	0,299	1,800	Active
394,320	394,598	0,278	4,500	Active
394,598	394,846	0,248	2,800	Active
394,846	395,188	0,342	4,500	Active
395,188	395,631	0,443	0,200	Active
395,631	396,085	0,454	1,000	Active
396,085	396,442	0,357	-1,400	Declive
396,442	396,736	0,294	1,300	Active
396,736	397,023	0,287	3,400	Active
397,023	397,324	0,301	-3,800	Declive
397,324	397,710	0,386	3,450	Active
397,710	398,688	0,978	0,000	Active
398,688	399,050	0,362	-2,200	Declive
399,050	399,472	0,422	-1,600	Declive
399,472	399,766	0,294	-3,200	Declive
399,766	400,165	0,399	4,500	Active
400,165	400,896	0,731	0,700	Active
400,896	401,855	0,959	-0,100	Declive
401,855	402,351	0,496	4,100	Active
402,351	402,869	0,518	-1,000	Declive
402,869	403,516	0,647	-3,100	Declive
403,516	403,871	0,355	2,600	Active
403,871	404,263	0,392	1,600	Active
404,263	404,586	0,323	-4,100	Declive
404,586	404,784	0,198	-1,500	Declive
404,784	406,073	1,289	-3,900	Declive
406,073	406,828	0,755	0,350	Active

Fonte: O autor.

A Tabela 17 apresenta a classificação vertical proposta no HCM 2022. É possível observar que as rampas são categorizadas de acordo com o seu valor inteiro, não há a possibilidade de interpolar valores decimais, como para obtenção de alguns fatores de equivalência no HCM 2016.

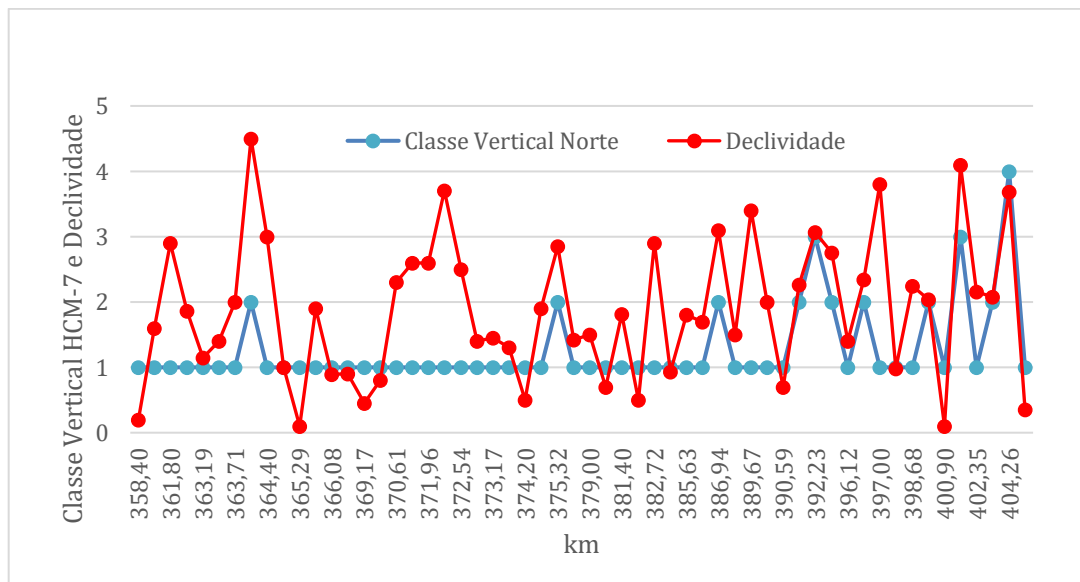
Tabela 17: Classificação vertical proposta HCM 2022

Extensão segmento		Inclinação (%)									
(mi)	(km)	≤ 1	> 1 ≤ 2	> 2 ≤ 3	> 3 ≤ 4	> 4 ≤ 5	> 5 ≤ 6	> 6 ≤ 7	> 7 ≤ 8	> 8 ≤ 9	> 9
≤ 0.1	≤ 0,16	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	2 (2)
> 0.1 ≤ 0.2	> 0,16 ≤ 0,32	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	2 (2)	3 (2)	3 (3)	3 (3)
> 0.2 ≤ 0.3	> 0,32 ≤ 0,48	1 (1)	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	3 (2)	3 (3)	4 (3)	4 (4)	5 (5)
> 0.3 ≤ 0.4	> 0,48 ≤ 0,64	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	3 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (4)	5 (5)	5 (5)
> 0.4 ≤ 0.5	> 0,64 ≤ 0,80	1 (1)	1 (1)	2 (1)	2 (2)	3 (3)	4 (3)	5 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0.5 ≤ 0.6	> 0,80 ≤ 0,96	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0.6 ≤ 0.7	> 0,96 ≤ 1,12	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (2)	4 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0.7 ≤ 0.8	> 1,12 ≤ 1,28	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (3)	4 (4)	5 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0.8 ≤ 0.9	> 1,28 ≤ 1,44	1 (1)	1 (1)	2 (1)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 0.9 ≤ 1.0	> 1,44 ≤ 1,60	1 (1)	1 (1)	2 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 1.0 ≤ 1.1	> 1,60 ≤ 1,77	1 (1)	1 (1)	2 (2)	3 (3)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)
> 1.1	> 1,77	1 (1)	1 (1)	2 (2)	4 (4)	4 (4)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)	5 (5)

Fonte: O autor.

Dessa forma a primeira etapa consistiu no agrupamento das rampas sucessivas de mesmo sinal e valores que não variavam mais de uma unidade, reduzindo o número de rampas de 105 para 94. Na sequência as rampas sucessivas de mesmo sinal foram ponderadas desde que essa ponderação não resultasse na modificação da classe vertical, resultando então em 57 rampas, conforme apresentado na Tabela 18 e representado na Figura 16. Neste processo observou-se que a ponderação de rampas sucessivas com a alteração da classe vertical embora resultasse em rampas de maiores extensão, também resultava em rampas de menor declividade.

Figura 16: Representação da classe vertical e declividades em módulo (HCM 2022)



Fonte: O autor.

Tabela 18: Rampas verticais trecho experimental após ponderação

km Inicial (BR-163)	km Final (BR-163)	Extensão (km)	Inclinação Inteira (%)	Classe Vertical Norte	Classe Vertical Sul	Inclinação Inicial (%)	Active/ Declive
358,395	359,226	0,831	-1,000	1	1	-0,200	Declive
359,226	361,829	2,603	2,000	2	1	1,600	Active
361,829	362,280	0,451	-3,000	1	1	-2,900	Declive
362,280	363,191	0,911	2,000	1	1	1,860	Active
363,191	363,518	0,327	-2,000	1	1	-1,150	Declive
363,518	363,706	0,188	2,000	1	1	1,400	Active
363,706	363,925	0,219	-2,000	1	1	-2,000	Declive
363,925	364,384	0,459	5,000	2	2	4,500	Active
364,384	364,718	0,334	-3,000	1	1	-3,000	Declive
364,718	365,293	0,575	1,000	1	1	1,000	Active
365,293	365,682	0,389	-1,000	1	1	-0,100	Declive
365,682	366,043	0,361	2,000	1	1	1,900	Active
366,043	367,402	1,359	-1,000	1	1	-0,890	Declive
367,402	369,173	1,771	1,000	1	1	0,900	Active
369,173	370,044	0,871	-1,000	1	1	-0,450	Declive
370,044	370,607	0,563	1,000	1	1	0,800	Active
370,607	371,651	1,044	-3,000	1	1	-2,300	Declive
371,651	371,976	0,325	3,000	1	1	2,600	Active
371,976	372,286	0,310	-3,000	1	1	-2,600	Declive
372,286	372,549	0,263	4,000	1	1	3,700	Active
372,549	372,744	0,195	-3,000	1	1	-2,500	Declive
372,744	373,166	0,422	2,000	1	1	1,400	Active
373,166	373,830	0,664	-2,000	1	1	-1,450	Declive
373,830	374,175	0,345	2,000	1	1	1,300	Active
374,175	374,548	0,373	-1,000	1	1	-0,500	Declive
374,548	375,323	0,775	2,000	1	1	1,900	Active
375,323	377,423	2,100	-3,000	2	2	-2,850	Declive
377,423	379,000	1,577	2,000	1	1	1,420	Active
379,000	379,381	0,381	-2,000	1	1	-1,500	Declive
379,381	381,401	2,020	1,000	1	1	0,700	Active
381,401	382,171	0,770	-2,000	1	1	-1,810	Declive
382,171	382,719	0,548	1,000	1	1	0,500	Active
382,719	383,054	0,335	-3,000	1	1	-2,900	Declive
383,054	385,632	2,578	1,000	1	1	0,930	Active
385,632	385,943	0,311	-2,000	1	1	-1,800	Declive
385,943	386,935	0,992	2,000	1	1	1,700	Active
386,935	387,942	1,007	-4,000	2	3	-3,100	Declive
387,942	389,670	1,728	2,000	1	1	1,500	Active
389,670	390,052	0,382	-4,000	1	2	-3,400	Declive
390,052	390,592	0,540	2,000	1	1	2,000	Active
390,592	391,071	0,479	-1,000	1	1	-0,700	Declive
391,071	392,229	1,158	3,000	1	1	2,260	Active
392,229	393,082	0,853	-3,000	1	2	-2,300	Declive
393,082	393,424	0,342	-5,000	2	2	-5,000	Declive
393,424	396,085	2,661	3,000	3	3	2,750	Active
396,085	396,442	0,357	-2,000	1	1	-1,400	Declive
396,442	397,023	0,581	3,000	2	1	2,340	Active
397,023	397,324	0,301	-4,000	1	1	-3,800	Declive
397,324	398,688	1,364	1,000	2	1	0,980	Active
398,688	399,766	1,078	-3,000	1	2	-2,240	Declive
399,766	400,896	1,130	3,000	2	2	2,040	Active
400,896	401,855	0,959	-1,000	1	1	-0,100	Declive
401,855	402,351	0,496	5,000	3	2	4,100	Active
402,351	403,516	1,165	-3,000	1	1	-2,160	Declive
403,516	404,263	0,747	3,000	2	1	2,080	Active
404,263	406,073	1,810	-4,000	2	2	-3,680	Declive
406,073	406,828	0,755	1,000	1	1	0,350	Active

Fonte: O autor.

Ao longo do trecho experimental foram identificadas apenas três curvas horizontais que não foram classificadas como tangente segundo os critérios do HCM 2022 (Tabela 19), tendo em vista que após determinada combinação de raio e superelevação as curvas não são classificadas quanto a classe horizontal, sendo consideradas como tangentes.

Tabela 19: Curvas horizontais trecho experimental

Nº	Início (km)	Final (km)	Extensão (m)	Tipo	Raio (m)	Raio (ft)	Superelevação (%)	Classe Horizontal
1	358,52	358,80	279,01	Curva	400	1.312	2,50	1
3	359,23	359,49	261,22	Curva	375	1.230	8,00	1
5	374,46	374,90	434,81	Curva	620	2.034	2,00	1

Fonte: O autor.

A relação das faixas adicionais ao longo do trecho experimental encontra-se apresentada na Tabela 20.

Tabela 20: Relação das faixas adicionais existentes no trecho experimental

Nº	Início (km)	Final (km)	Extensão (m)	Tipo	Código	Tipo de Pista	Faixa Adicional
-	386,85	387,07	220,00	Tangente	T-28	Simples	Decrescente
57	387,07	387,65	581,33	Curva	C-34	Simples	Decrescente
63	392,38	392,71	336,20	Curva	C-37	Simples	Decrescente
64	392,71	393,00	280,46	Tangente	T-32	Simples	Decrescente
65	393,00	393,31	314,43	Curva	C-38	Simples	Decrescente
68	393,80	393,90	100,22	Tangente	T-34	Simples	Crescente
69	393,90	394,38	476,54	Curva	C-6	Simples	Crescente
70	394,38	394,38	0,00	Tangente	T-35	Simples	Crescente
71	394,38	395,03	654,10	Curva	C-7	Simples	Crescente
72	395,03	395,03	0,00	Tangente	T-36	Simples	Crescente
73	395,03	395,25	219,36	Curva	C-8	Simples	Crescente
-	395,25	395,50	250,00	Tangente	T-37	Simples	Crescente
-	404,10	404,94	840,00	Tangente	T-43	Simples	Decrescente
87	404,94	405,34	399,28	Curva	C-44	Simples	Decrescente
-	405,34	405,60	260,00	Tangente	T-44	Simples	Decrescente

Fonte: O autor.

Para identificar os segmentos de ultrapassagem proibida e permitida ao longo do trecho em análise é necessário o cadastro das Linha de Divisão de Fluxos Opostos (LFO) em cada uma das suas 5 categorias, a saber: i) LFO-01: Linha Simples Contínua; ii) LFO-02: Linha Simples Seccionada ; iii) LFO-03: Linha Dupla Contínua ; iv) LFO-04: Linha Contínua / Seccionada; e v) MRF: Linha Dupla Seccionada. A Tabela 21 apresenta a identificação dos segmentos de ultrapassagem proibida e permitida, obtidos de forma visual após consulta a ferramenta *Street View* do software *Google Earth*.

Tabela 21: Identificação segmentos de ultrapassagem proibida e permitida

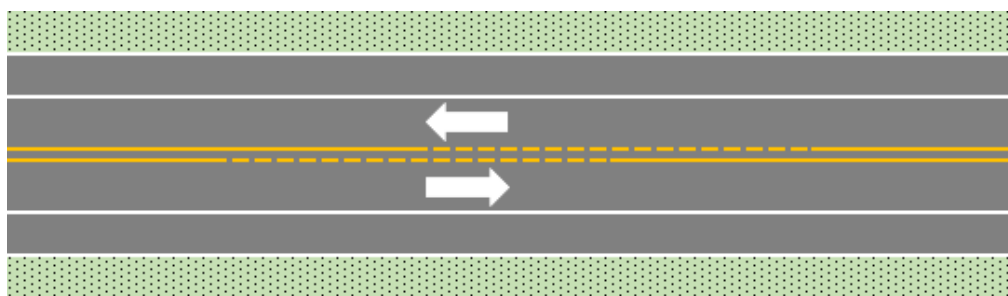
km Inicial (BR-163)	km Final (BR-163)	Extensão (km)	Sinalização Horizontal	Sentido	Ultrapassagem
358,520	359,880	1,360	LFO-03	Ambos	Impedida
359,880	360,180	0,300	LFO-04	Norte	Permitida Norte
360,180	360,550	0,370	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
360,550	360,750	0,200	LFO-04	Sul	Permitida Sul
360,750	361,070	0,320	LFO-03	Ambos	Impedida
361,070	361,300	0,230	LFO-04	Norte	Permitida Norte
361,300	361,550	0,250	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
361,550	361,800	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
361,800	362,100	0,300	LFO-04	Norte	Permitida Norte
362,100	362,300	0,200	LFO-04	Sul	Permitida Sul
362,300	362,520	0,220	LFO-03	Ambos	Impedida
362,520	362,820	0,300	LFO-04	Norte	Permitida Norte
362,820	363,120	0,300	LFO-04	Sul	Permitida Sul
363,120	363,400	0,280	LFO-04	Norte	Permitida Norte
363,400	363,650	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
363,650	363,950	0,300	LFO-04	Norte	Permitida Norte
363,950	364,400	0,450	LFO-04	Sul	Permitida Sul
364,400	364,550	0,150	LFO-03	Ambos	Impedida
364,550	364,850	0,300	LFO-04	Norte	Permitida Norte
364,850	365,350	0,500	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
365,350	365,570	0,220	LFO-04	Sul	Permitida Sul
365,570	366,080	0,510	LFO-03	Ambos	Impedida
366,080	366,350	0,270	LFO-04	Norte	Permitida Norte
366,350	366,680	0,330	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
366,680	366,940	0,260	LFO-04	Sul	Permitida Sul
366,940	367,100	0,160	LFO-03	Ambos	Impedida
367,100	367,330	0,230	LFO-04	Norte	Permitida Norte
367,330	367,600	0,270	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
367,600	367,900	0,300	LFO-04	Sul	Permitida Sul
367,900	368,150	0,250	LFO-04	Norte	Permitida Norte
368,150	368,400	0,250	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
368,400	368,620	0,220	LFO-04	Sul	Permitida Sul
368,620	369,100	0,480	LFO-03	Ambos	Impedida
369,100	369,350	0,250	LFO-04	Norte	Permitida Norte
369,350	369,670	0,320	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
369,670	369,920	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
369,920	371,360	1,440	LFO-03	Ambos	Impedida
371,360	371,630	0,270	LFO-04	Norte	Permitida Norte
371,630	371,770	0,140	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
371,770	371,960	0,190	LFO-04	Sul	Permitida Sul
371,960	372,240	0,280	LFO-04	Norte	Permitida Norte
372,240	372,540	0,300	LFO-04	Sul	Permitida Sul
372,540	372,780	0,240	LFO-04	Norte	Permitida Norte
372,780	372,920	0,140	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
372,920	373,170	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
373,170	373,700	0,530	LFO-03	Ambos	Impedida
373,700	373,900	0,200	LFO-04	Norte	Permitida Norte
373,900	374,000	0,100	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
374,000	374,200	0,200	LFO-04	Sul	Permitida Sul
374,200	374,850	0,650	LFO-03	Ambos	Impedida
374,850	375,070	0,220	LFO-04	Norte	Permitida Norte
375,070	375,270	0,200	LFO-04	Sul	Permitida Sul
375,270	375,400	0,130	LFO-03	Ambos	Impedida
375,400	375,650	0,250	LFO-04	Norte	Permitida Norte
375,650	376,180	0,530	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
376,180	376,380	0,200	LFO-04	Sul	Permitida Sul
376,380	377,600	1,220	LFO-03	Ambos	Impedida
377,600	377,730	0,130	LFO-04	Norte	Permitida Norte
377,730	377,800	0,070	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
377,800	378,100	0,300	LFO-04	Sul	Permitida Sul
378,100	378,300	0,200	LFO-03	Ambos	Impedida
378,300	378,550	0,250	LFO-04	Norte	Permitida Norte
378,550	378,680	0,130	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
378,680	378,930	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
378,930	379,300	0,370	LFO-03	Ambos	Impedida
379,300	379,500	0,200	LFO-04	Norte	Permitida Norte

379,500	379,930	0,430	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
379,930	380,170	0,240	LFO-04	Sul	Permitida Sul
380,170	380,270	0,100	LFO-03	Ambos	Impedida
380,270	380,500	0,230	LFO-04	Norte	Permitida Norte
380,500	381,120	0,620	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
381,120	381,350	0,230	LFO-04	Sul	Permitida Sul
381,350	381,650	0,300	LFO-03	Ambos	Impedida
381,650	381,900	0,250	LFO-04	Norte	Permitida Norte
381,900	382,500	0,600	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
382,500	382,850	0,350	LFO-04	Sul	Permitida Sul
382,850	383,800	0,950	LFO-03	Ambos	Impedida
383,800	384,070	0,270	LFO-04	Norte	Permitida Norte
384,070	384,350	0,280	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
384,350	384,600	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
384,600	384,850	0,250	LFO-04	Norte	Permitida Norte
384,850	385,350	0,500	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
385,350	385,580	0,230	LFO-04	Sul	Permitida Sul
385,580	385,700	0,120	LFO-03	Ambos	Impedida
385,700	385,930	0,230	LFO-04	Norte	Permitida Norte
385,930	386,550	0,620	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
386,550	386,800	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
386,800	387,600	0,800	LFO-03	Ambos	Impedida
387,600	387,720	0,120	LFO-04	Norte	Permitida Norte
387,720	387,930	0,210	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
387,930	388,050	0,120	LFO-04	Sul	Permitida Sul
388,050	388,200	0,150	LFO-03	Ambos	Impedida
388,200	388,330	0,130	LFO-04	Norte	Permitida Norte
388,330	388,500	0,170	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
388,500	388,700	0,200	LFO-04	Sul	Permitida Sul
388,700	389,730	1,030	LFO-03	Ambos	Impedida
389,730	390,000	0,270	LFO-04	Norte	Permitida Norte
390,000	390,150	0,150	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
390,150	390,400	0,250	LFO-04	Sul	Permitida Sul
390,400	390,650	0,250	LFO-03	Ambos	Impedida
390,650	390,850	0,200	LFO-04	Norte	Permitida Norte
390,850	391,900	1,050	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
391,900	392,100	0,200	LFO-04	Norte	Permitida Norte
392,100	395,500	3,400	LFO-03	Ambos	Impedida
395,500	395,770	0,270	LFO-04	Norte	Permitida Norte
395,770	395,900	0,130	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
395,900	396,120	0,220	LFO-04	Sul	Permitida Sul
396,120	396,300	0,180	LFO-03	Ambos	Impedida
396,300	396,500	0,200	LFO-04	Norte	Permitida Norte
396,500	396,700	0,200	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
396,700	397,000	0,300	LFO-04	Sul	Permitida Sul
397,000	398,680	1,680	LFO-03	Ambos	Impedida
398,680	399,000	0,320	LFO-04	Norte	Permitida Norte
399,000	399,300	0,300	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
399,300	399,570	0,270	LFO-04	Sul	Permitida Sul
399,570	400,160	0,590	LFO-03	Ambos	Impedida
400,160	400,370	0,210	LFO-04	Norte	Permitida Norte
400,370	401,670	1,300	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
401,670	401,900	0,230	LFO-04	Sul	Permitida Sul
401,900	402,350	0,450	LFO-03	Ambos	Impedida
402,350	402,630	0,280	LFO-04	Norte	Permitida Norte
402,630	402,870	0,240	LFO-03	Ambos	Impedida
402,870	403,150	0,280	LFO-04	Norte	Permitida Norte
403,150	403,320	0,170	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
403,320	403,600	0,280	LFO-04	Sul	Permitida Sul
403,600	405,700	2,100	LFO-03	Ambos	Impedida
405,700	405,900	0,200	LFO-04	Norte	Permitida Norte
405,900	406,500	0,600	LFO-02	Ambos	Permitida Ambos
406,500	406,890	0,390	LFO-04	Sul	Permitida Sul

Fonte: O autor.

Da Tabela 21 é possível notar um padrão na sinalização horizontal de divisão de fluxos opostos. Os segmentos de ultrapassagem quase em sua totalidade seguem este padrão ao longo do trecho experimental, alternando 3 momentos distintos, primeiro permitindo a ultrapassagem no sentido norte, em seguida a ultrapassagem passa a ser permitida em ambos os sentidos e, por último, a ultrapassagem é permitida no sentido sul, conforme ilustrado na Figura 17. Isso faz com que ao longo do trecho experimental com extensão de aproximadamente 48,37 km, existam 129 trocas da LFO, contribuindo para um número extremamente elevado de segmentos homogêneos.

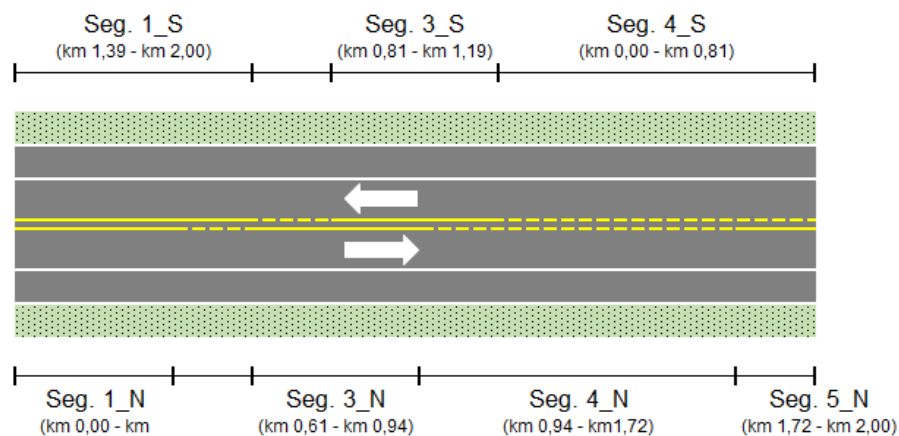
Figura 17: Representação variação LFO



Fonte: O autor

O HCM 2022 recomenda que a segmentação seja determinada separadamente para cada sentido de tráfego. Ocorre que nesta hipótese haverá uma segmentação diferente entre o sentido norte e o sentido sul, dificultando sobremaneira a indicação dos segmentos de rodovia 2+1, por exemplo, ou a compatibilidade com as etapas seguintes do projeto, conforme ilustrado na Figura 18.

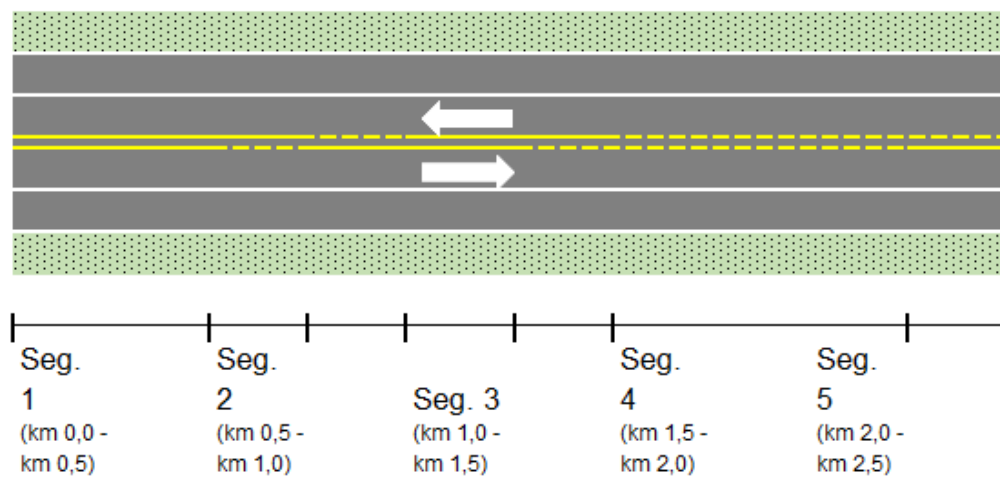
Figura 18: Representação variação LFO (segmentação diferente por sentido de tráfego)



Fonte: O autor

Embora não se tenham encontrado estudos abordando especificamente este assunto, Martins *et. al.* (2018); Andrade e Setti (2015); Martins e Barbosa (2015) que de alguma forma estudaram métodos para segmentação homogênea em rodovias não mencionam a possibilidade da adoção de uma segmentação diferente para cada sentido de tráfego, tendo em vista que a segmentação de rodovias de pista simples é direcional. Dessa forma, optou-se pela compatibilização dos segmentos homogêneos entre o sentido Norte e sentido Sul, conforme apresentado na Figura 19, mesmo sabendo da perspectiva de aumento do número de segmentos homogêneos, resultando em alguns segmentos com reduzida extensão, caso contrário não seria possível analisar as intervenções nos mesmos locais com as mesmas extensões no HCM 2016 e no HCM 2022 .

Figura 19: Representação variação LFO (compatibilização segmentos homogêneos)



Fonte: O autor

A Tabela 22 apresenta o volume de tráfego determinado para o trecho experimental considerando ambos os sentidos para o ano 0 do horizonte de projeto 0 (2022). Pode-se observar uma participação expressiva de caminhões de grande porte na composição da frota de veículos, próximo de 75% de tráfego comercial. A Tabela 23 apresenta a projeção dos volumes de tráfego ao longo de cada ano do horizonte de projeto utilizando a taxa de crescimento de 3% a.a.

Tabela 22: Determinação VMD para trecho experimental - PP-05 (Ano de 2022)

Concessão Rota do Oeste	Praça	Rodovia	km	Município	Categoria								
					Moto	Passeio	2C	3C	2S2	2S3	3S3	CVC	Total
PP-05		BR-163/MT	398,00	Jangada	78	1.441	325	374	635	408	1065	2.026	6.352

Fonte: O autor.

Tabela 23: Projeção do VMD e volume horário trecho experimental - PP-05 (Ano de 2022)

Ano de Projeto	VMD (veh./dia)	Vd (veh/h)	Vo (veh/h)	Vd+Vo (veh/h)
0 = 2022	6.352	322	304	626
1 = 2023	6.543	332	313	645
2 = 2024	6.739	342	322	664
3 = 2025	6.941	352	332	684
4 = 2026	7.149	363	342	705
5 = 2027	7.364	374	352	726
6 = 2028	7.585	385	363	748
7 = 2029	7.812	396	374	770
8 = 2030	8.047	408	385	793
9 = 2031	8.288	420	396	816
10 = 2032	8.537	433	408	841
11 = 2033	8.793	446	421	867
12 = 2034	9.056	459	433	892
13 = 2035	9.328	473	446	919
14 = 2036	9.608	487	460	947
15 = 2037	9.896	502	473	975
16 = 2038	10.193	517	488	1.005
17 = 2039	10.499	533	502	1.035
18 = 2040	10.814	549	517	1.066
19 = 2041	11.138	565	533	1.098
20 = 2042	11.472	582	549	1.131
21 = 2043	11.817	599	565	1.164
22 = 2044	12.171	617	582	1.199
23 = 2045	12.536	636	600	1.236
24 = 2046	12.912	655	618	1.273
25 = 2047	13.300	675	636	1.311
26 = 2048	13.699	695	655	1.350
27 = 2049	14.110	716	675	1.391
28 = 2050	14.533	737	695	1.432
29 = 2051	14.969	759	716	1.475
30 = 2052	15.418	782	737	1.519
31 = 2053	15.881	806	760	1.566
32 = 2054	16.357	830	782	1.612
33 = 2055	16.848	855	806	1.661
34 = 2056	17.353	880	830	1.710
35 = 2057	17.874	907	855	1.762
36 = 2058	18.410	934	881	1.815
37 = 2059	18.962	962	907	1.869
38 = 2060	19.531	991	934	1.925
39 = 2061	20.117	1.021	962	1.983
40 = 2062	20.720	1.051	991	2.042
41 = 2063	21.342	1.083	1.021	2.104
42 = 2064	21.982	1.115	1.051	2.166
43 = 2065	22.642	1.149	1.083	2.232
44 = 2066	23.321	1.183	1.116	2.299
45 = 2067	24.021	1.219	1.149	2.368
46 = 2068	24.741	1.255	1.183	2.438
47 = 2069	25.484	1.293	1.219	2.512
48 = 2070	26.248	1.332	1.256	2.588
49 = 2071	27.036	1.372	1.293	2.665
50 = 2072	27.847	1.413	1.332	2.745

Fonte: O autor.

Após os critérios mencionados nessa seção foram determinados 181 segmentos homogêneos para o trecho experimental, entretanto alguns desses segmentos se diferenciam apenas entre tangente e curva, sendo considerados como subsegmentos, resultando em 124 segmentos homogêneos. A segmentação homogênea para o HCM 2016 foi compatibilizada como HCM 2022, para verificar os níveis de serviço após a implantação das faixas adicionais nos mesmos locais, com as mesmas extensões.

5 RESULTADOS DOS NÍVEIS DE SERVIÇO

Nesta seção são apresentados os resultados dos níveis de serviço considerando os cenários apresentados na Tabela 15, seção 3.2. O nível de serviço para os cenários 1 a 8 foram obtidos utilizando o HCM 2022, enquanto o nível de serviço para os cenários 9 a 16 foram obtidos considerando o HCM 2016. Os cenários de 1 a 4 se referem as rodovias com velocidade regulamentada inferior a 50 mi/h, enquanto os cenários 5 a 8 se referem as rodovias com velocidade regulamentada igual ou superior a 50 mi/h. Ocorre que a intervenção prevista para os cenários 4 e 8 são a duplicação, e, como não houve atualizações significativas entre o método do HCM 2022 em relação ao HCM 2016 para rodovias de pista dupla, os cenários 4 e 8 foram desconsiderados da análise. Os cenários de 9 a 12 se referem as rodovias considerando a classificação do relevo como plano, enquanto os cenários 13 a 16 se referem as rodovias considerando a classificação do relevo como ondulado.

As faixas adicionais foram posicionadas adotando a mesma disposição para os cenários 2, 6, 10 e 14. Ao todo foram consideradas a implantação de 7 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 24. 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, conforme anteriormente apresentado na Tabela 20. 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 24 aquela que apresentou melhor desempenho para o trecho experimental.

Tabela 24: 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)

Fonte: O autor.

Da mesma forma, em relação a rodovia 2+1 as faixas adicionais foram posicionadas adotando a mesma disposição para os cenários cenário 3, 7, 11 e 15, considerando a implantação de 21 faixas adicionais totalizando 30,65 km, aproximadamente 64% da extensão total do trecho experimental, sendo 16,03 km (33,14%) no sentido norte e 14,62 km (30,23%) no sentido sul, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25: 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)

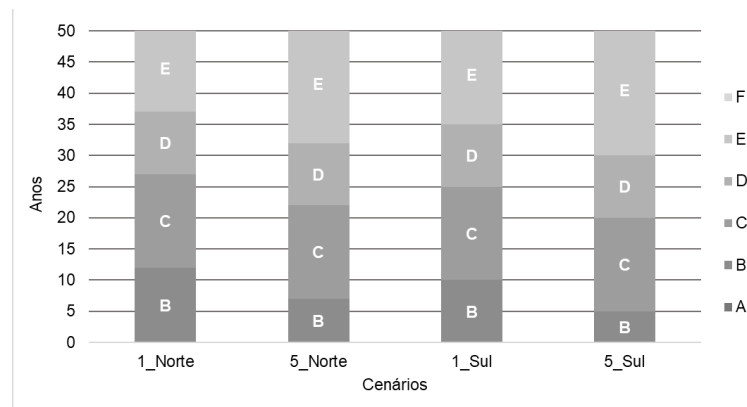
Fonte: O autor.

Os cenários 12 e 16 consideraram a duplicação ao longo de todo o trecho experimental, totalizando 48,37 km.

5.1 HCM 2022

O primeiro resultado consiste na comparação análise do impacto da Tabela 13 para a determinação dos níveis de serviço, considerando a divisão entre as rodovias com velocidade regulamentada inferior a 50 mi/h das rodovias com velocidade regulamentada igual ou superior a 50 mi/h, conforme apresentado na Figura 20. Observa-se a diferença de 5 anos na transição dos níveis de serviço tanto no sentido norte quanto no sentido sul, sendo os níveis de serviço atingidos primeiro para os segmentos com velocidade regulamentada igual ou superior a 50 mi/h.

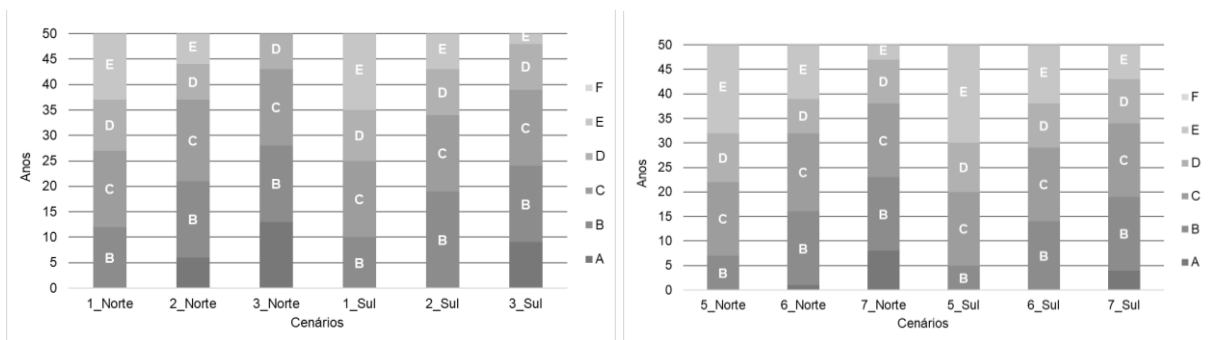
Figura 20: NS cenários 1 x cenário 5



Fonte: O autor

A Figura 21 apresenta a comparação dos níveis de serviço entre os cenários 1 2 3 (a) e 5, 6 e 7 (b) sendo possível constatar que as faixas adicionais (cenários 2 e 6) se comparada ao cenário 1 e 5 (sem projeto) melhoram em um grau o nível de serviço, adiando de 7 a 10 anos o atingimento do mesmo nível de serviço da condição sem projeto. Já a rodovia 2+1 melhora os níveis de serviço de 1 a 2 graus, demorando em média 16 anos para atingir a mesma condição operacional antes de sua implantação.

Figura 21: NS cenários 1 x 2 x 3 (a) e cenários 5 x 6 x 7 (b)



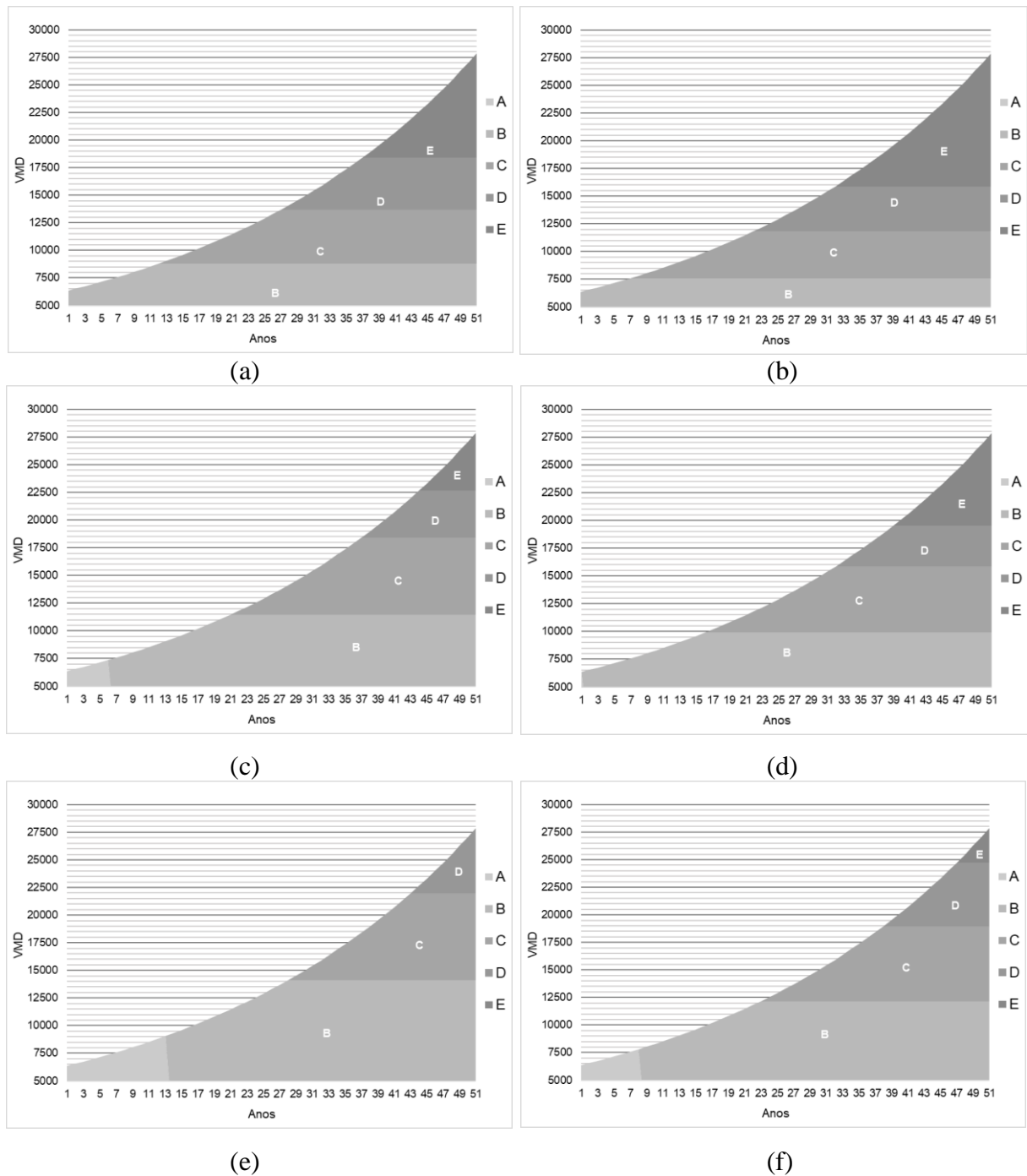
(a) NS cenários 1 x 2 x 3

(b) NS cenários 5 x 6 x 7

Fonte: O autor

A Figura 22 apresenta o VMD onde ocorre a transição dos níveis de serviço para os cenários 1, 2, 3, 5, 6 e 7. É possível notar uma variação significativa dos valores em função do tipo da intervenção de ampliação da capacidade.

Figura 22: Volumes de atingimento NS (sentido norte) cenários 1(a), 5(b), 2(c), 6(d), 3(e),7(f)

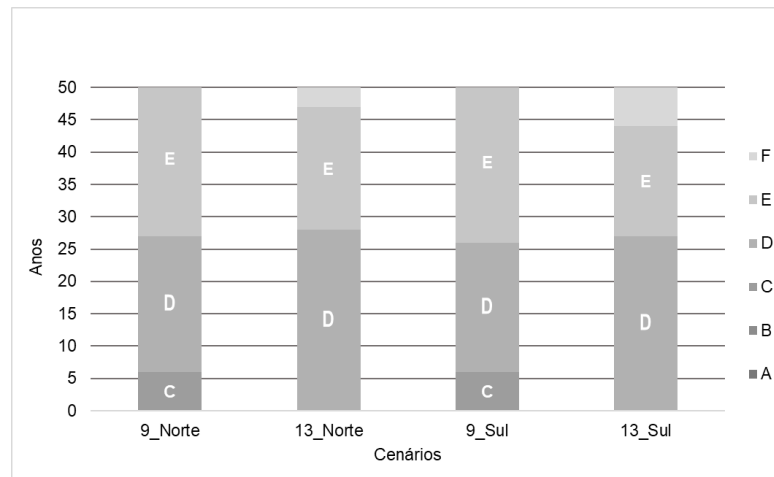


Fonte: O autor

5.2 HCM 2016

O resultado da comparação relacionada a determinação dos níveis de serviço considerando o relevo com plano (cenário 9) e ondulado (cenário 13) é apresentado na Figura 23. Observa-se a diferença de 6 anos na transição dos níveis de serviço nos primeiros anos de análise. Ao longo do período de projeto esta diferença reduziu para um ou dois anos.

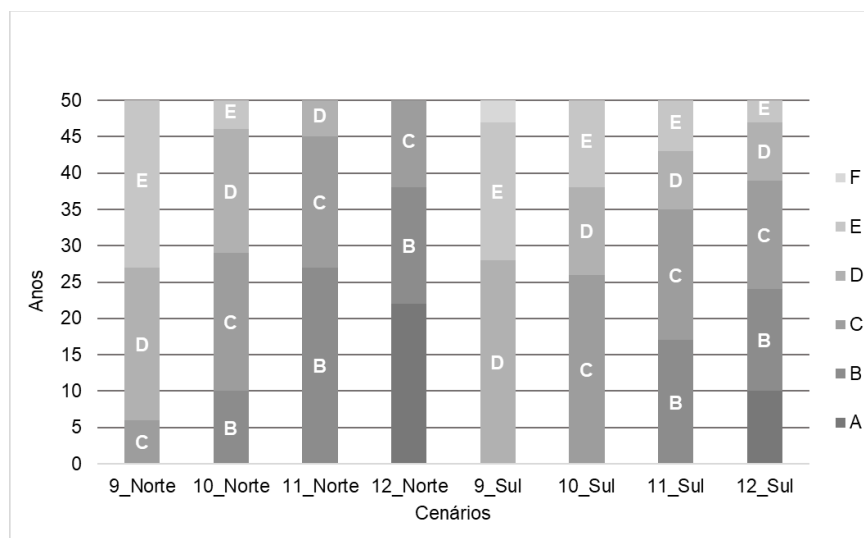
Figura 23: NS cenários 9 x cenário 13



Fonte: O autor

A Figura 24 apresenta a comparação dos níveis de serviço entre os cenários 9, 10, 11 e 12 (a) e 13, 14, 15, 16 (b) sendo possível constatar que as 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 da condição sem projeto. Já a rodovia 2+1 melhora os níveis de serviço de 1 a 2 graus, demorando em média 20 anos para atingir a mesma condição operacional antes de sua implantação.

Figura 24: NS cenários 9 x 10 x 11 x 12 (a) e cenários 13 x 14 x 15 x 16 (b)



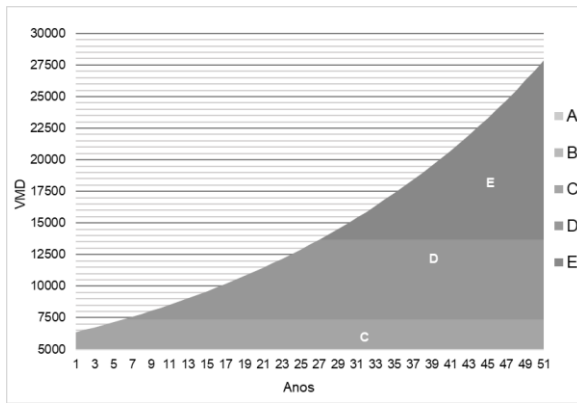
(b)

Fonte: O autor

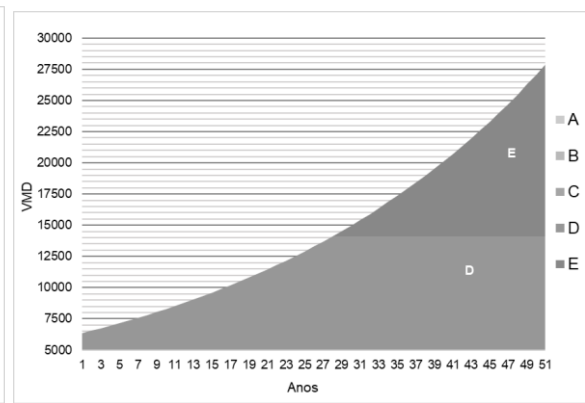
(b)

A Figura 25 apresenta o VMD onde ocorre a transição dos níveis de serviço para os cenários 9, 10, 11, 12, 13 e 14. É possível notar uma variação significativa dos valores em função do tipo da intervenção de ampliação da capacidade.

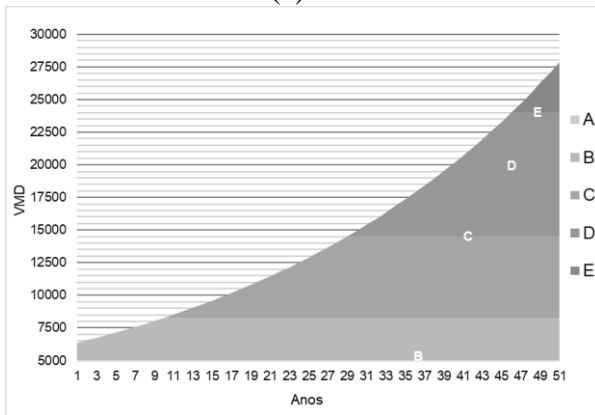
Figura 25: Volumes de atingimento NS (sentido norte) cenários 9(a), 13(b), 10(c), 14(d), 11(e), 15(f), 12 (g) e 16(h)



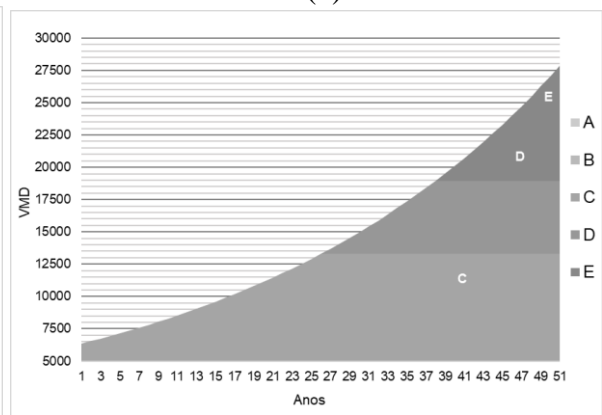
(a)



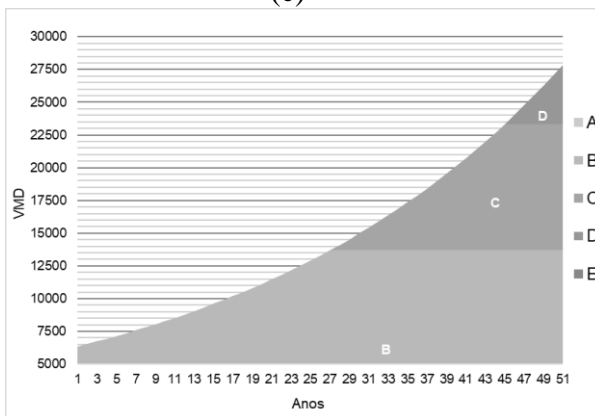
(b)



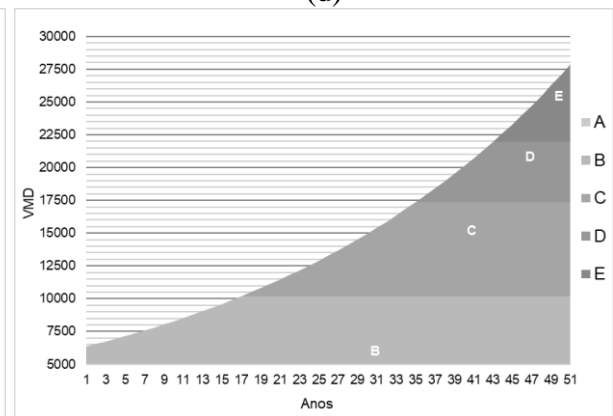
(c)



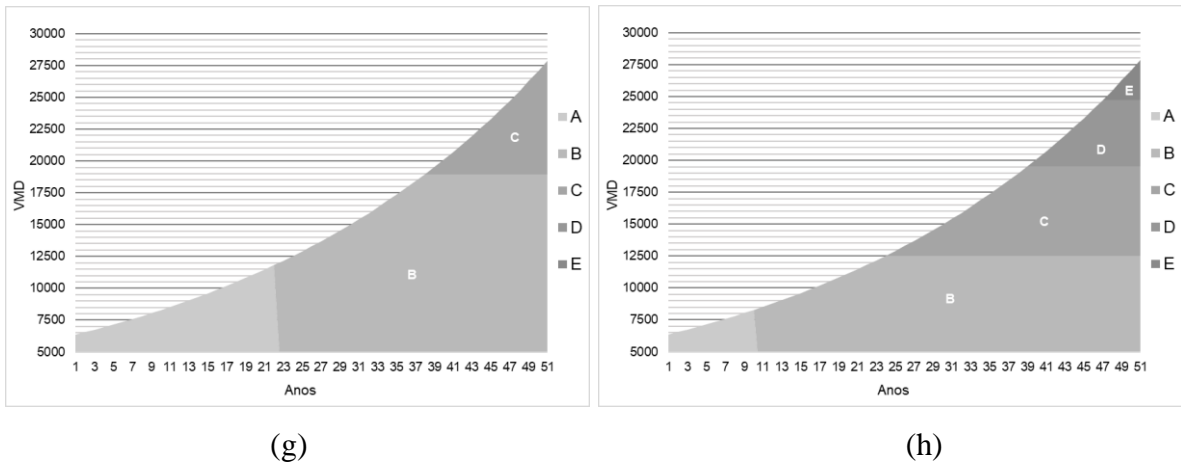
(d)



(e)



(f)

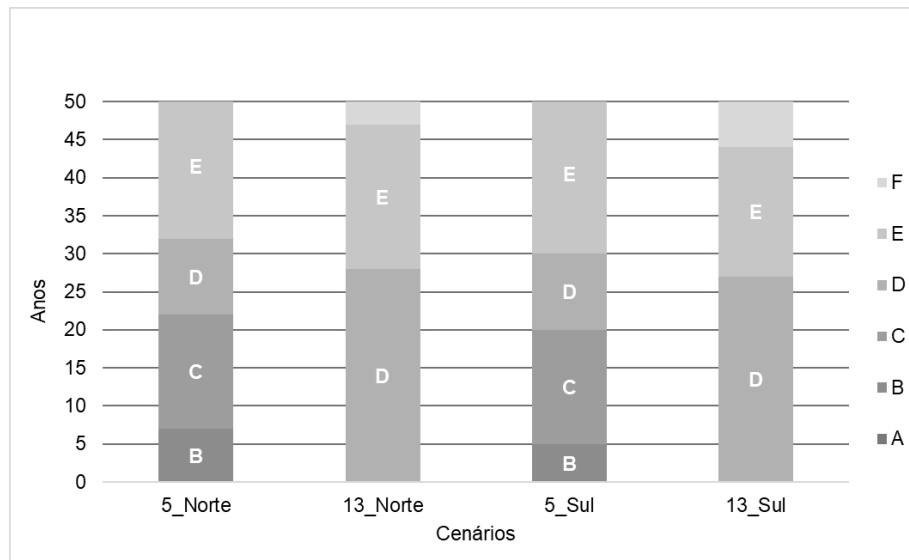


Fonte: O autor

5.3 HCM 2022 x HCM 2016

Em relação a comparação dos resultados dos níveis de serviço entre o HCM 2022 e HCM 2016 foi possível observar uma diferença de dois graus do nível de serviço para melhor no HCM 2022 se comparado ao HCM 2016, tomando como base os cenários 5 e 13, conforme ilustrado na Figura 26. A diferença de atingimento do nível de serviço “D” entre ambos os métodos é de 20 anos, ou seja, o nível de serviço calculado determinado com o HCM2022 passa ser o mesmo nível de serviço determinado utilizando o HCM 2016 próximo do 20º ano de projeto.

Figura 26: NS cenário 5 (HCM 2022) x cenário 13 (HCM 2016)



Fonte: O autor

A Tabela 26 e Tabela 27 apresentam os resultados dos níveis de serviço para todos os cenários ao longo do período de projeto.

Tabela 26: Resultado dos níveis de serviço para todos os cenários sentido norte

Ano de Projeto	Parâmetros de Tráfego				Cenários (Sentido Norte)															
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	VMD (veh./dia)	Vd (veh/h)	Vo (veh/h)	Vd+Vo (veh/h)	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	
0 = 2022	6.352	322	304	626	B	A	A	-	B	A	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
1 = 2023	6.543	332	313	645	B	A	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
2 = 2024	6.739	342	322	664	B	A	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
3 = 2025	6.941	352	332	684	B	A	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
4 = 2026	7.149	363	342	705	B	A	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
5 = 2027	7.364	374	352	726	B	A	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
6 = 2028	7.585	385	363	748	B	B	A	-	B	B	A	-	D	B	B	A	D	C	B	A
7 = 2029	7.812	396	374	770	B	B	A	-	C	B	A	-	D	B	B	A	D	C	B	A
8 = 2030	8.047	408	385	793	B	B	A	-	C	B	B	-	D	B	B	A	D	C	B	A
9 = 2031	8.288	420	396	816	B	B	A	-	C	B	B	-	D	B	B	A	D	C	B	A
10 = 2032	8.537	433	408	841	B	B	A	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
11 = 2033	8.793	446	421	867	B	B	A	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
12 = 2034	9.056	459	433	892	C	B	A	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
13 = 2035	9.328	473	446	919	C	B	B	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
14 = 2036	9.608	487	460	947	C	B	B	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
15 = 2037	9.896	502	473	975	C	B	B	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
16 = 2038	10.193	517	488	1.005	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
17 = 2039	10.499	533	502	1.035	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	C	B
18 = 2040	10.814	549	517	1.066	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	C	B
19 = 2041	11.138	565	533	1.098	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	C	B
20 = 2042	11.472	582	549	1.131	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	C	B
21 = 2043	11.817	599	565	1.164	C	C	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	C	B
22 = 2044	12.171	617	582	1.199	C	C	B	-	D	C	B	-	D	C	B	B	D	C	C	B
23 = 2045	12.536	636	600	1.236	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	C	C	B
24 = 2046	12.912	655	618	1.273	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	C	C	C
25 = 2047	13.300	675	636	1.311	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	C	C	C
26 = 2048	13.699	695	655	1.350	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	D	C	C
27 = 2049	14.110	716	675	1.391	D	C	B	-	D	C	C	-	E	C	C	B	D	D	C	C
28 = 2050	14.533	737	695	1.432	D	C	C	-	D	C	C	-	E	C	C	B	E	D	C	C
29 = 2051	14.969	759	716	1.475	D	C	C	-	D	C	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
30 = 2052	15.418	782	737	1.519	D	C	C	-	D	C	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
31 = 2053	15.881	806	760	1.566	D	C	C	-	D	C	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
32 = 2054	16.357	830	782	1.612	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
33 = 2055	16.848	855	806	1.661	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
34 = 2056	17.353	880	830	1.710	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
35 = 2057	17.874	907	855	1.762	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	D	C
36 = 2058	18.410	934	881	1.815	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	D	C
37 = 2059	18.962	962	907	1.869	E	D	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	D	C
38 = 2060	19.531	991	934	1.925	E	D	C	-	E	D	D	-	E	D	C	C	E	E	D	C
39 = 2061	20.117	1.021	962	1.983	E	D	C	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	D	D
40 = 2062	20.720	1.051	991	2.042	E	D	C	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	D	D
41 = 2063	21.342	1.083	1.021	2.104	E	D	C	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	D	D
42 = 2064	21.982	1.115	1.051	2.166	E	D	C	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	D	D
43 = 2065	22.642	1.149	1.083	2.232	E	D	D	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	E	D
44 = 2066	23.321	1.183	1.116	2.299	E	E	D	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	E	D
45 = 2067	24.021	1.219	1.149	2.368	E	E	D	-	E	E	D	-	E	D	D	C	E	E	E	D
46 = 2068	24.741	1.255	1.183	2.438	E	E	D	-	E	E	D	-	E	E	D	C	E	E	E	D
47 = 2069	25.484	1.293	1.219	2.512	E	E	D	-	E	E	E	-	E	E	D	C	F	E	E	E
48 = 2070	26.248	1.332	1.256	2.588	E	E	D	-	E	E	E	-	E	E	D	C	F	E	E	E
49 = 2071	27.036	1.372	1.293	2.665	E	E	D	-	E	E	E	-	E	E	D	C	F	E	E	E
50 = 2072	27.847	1.413	1.332	2.745	E	E	D	-	E	E	E	-	E	E	D	C	F	E	E	E

Fonte: O autor.

Tabela 27: Resultado dos níveis de serviço para todos os cenários sentido sul

Ano de Projeto	Parâmetros de Tráfego				Cenários (Sentido Sul)															
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	VMD (veh./dia)	Vd (veh/h)	Vo (veh/h)	Vd+Vo (veh/h)	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	LOS	
0 = 2022	6.352	322	304	626	B	B	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
1 = 2023	6.543	332	313	645	B	B	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
2 = 2024	6.739	342	322	664	B	B	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
3 = 2025	6.941	352	332	684	B	B	A	-	B	B	A	-	C	B	B	A	D	C	B	A
4 = 2026	7.149	363	342	705	B	B	A	-	B	B	B	-	C	B	B	A	D	C	B	A
5 = 2027	7.364	374	352	726	B	B	A	-	C	B	B	-	C	B	B	A	D	C	B	A
6 = 2028	7.585	385	363	748	B	B	A	-	C	B	B	-	D	B	B	A	D	C	B	A
7 = 2029	7.812	396	374	770	B	B	A	-	C	B	B	-	D	B	B	A	D	C	B	A
8 = 2030	8.047	408	385	793	B	B	A	-	C	B	B	-	D	B	B	A	D	C	B	B
9 = 2031	8.288	420	396	816	B	B	A	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
10 = 2032	8.537	433	408	841	C	B	B	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
11 = 2033	8.793	446	421	867	C	B	B	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
12 = 2034	9.056	459	433	892	C	B	B	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
13 = 2035	9.328	473	446	919	C	B	B	-	C	B	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
14 = 2036	9.608	487	460	947	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
15 = 2037	9.896	502	473	975	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
16 = 2038	10.193	517	488	1.005	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
17 = 2039	10.499	533	502	1.035	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	B	B
18 = 2040	10.814	549	517	1.066	C	B	B	-	C	C	B	-	D	C	B	A	D	C	C	B
19 = 2041	11.138	565	533	1.098	C	C	B	-	C	C	C	-	D	C	B	A	D	C	C	B
20 = 2042	11.472	582	549	1.131	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	A	D	C	C	B
21 = 2043	11.817	599	565	1.164	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	C	C	B
22 = 2044	12.171	617	582	1.199	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	D	C	B
23 = 2045	12.536	636	600	1.236	C	C	B	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	D	C	B
24 = 2046	12.912	655	618	1.273	C	C	C	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	D	C	C
25 = 2047	13.300	675	636	1.311	D	C	C	-	D	C	C	-	D	C	B	B	D	D	C	C
26 = 2048	13.699	695	655	1.350	D	C	C	-	D	C	C	-	E	C	B	B	D	D	C	C
27 = 2049	14.110	716	675	1.391	D	C	C	-	D	C	C	-	E	C	C	B	E	D	C	C
28 = 2050	14.533	737	695	1.432	D	C	C	-	D	C	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
29 = 2051	14.969	759	716	1.475	D	C	C	-	D	D	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
30 = 2052	15.418	782	737	1.519	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
31 = 2053	15.881	806	760	1.566	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
32 = 2054	16.357	830	782	1.612	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	C	C
33 = 2055	16.848	855	806	1.661	D	C	C	-	E	D	C	-	E	D	C	B	E	D	D	C
34 = 2056	17.353	880	830	1.710	D	D	C	-	E	D	D	-	E	D	C	B	E	D	D	C
35 = 2057	17.874	907	855	1.762	E	D	C	-	E	D	D	-	E	D	C	B	E	D	D	C
36 = 2058	18.410	934	881	1.815	E	D	C	-	E	D	D	-	E	D	C	B	E	D	D	C
37 = 2059	18.962	962	907	1.869	E	D	C	-	E	D	D	-	E	D	C	C	E	D	D	D
38 = 2060	19.531	991	934	1.925	E	D	C	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	D	D
39 = 2061	20.117	1.021	962	1.983	E	D	D	-	E	E	D	-	E	D	C	C	E	E	D	D
40 = 2062	20.720	1.051	991	2.042	E	D	D	-	E	E	D	-	E	D	D	C	E	E	D	D
41 = 2063	21.342	1.083	1.021	2.104	E	D	D	-	E	E	D	-	E	D	D	C	E	E	E	D
42 = 2064	21.982	1.115	1.051	2.166	E	D	D	-	E	E	D	-	E	D	D	C	E	E	E	D
43 = 2065	22.642	1.149	1.083	2.232	E	E	D	-	E	E	E	-	E	D	D	C	E	E	E	D
44 = 2066	23.321	1.183	1.116	2.299	E	E	D	-	E	E	E	-	E	D	D	C	F	E	E	D
45 = 2067	24.021	1.219	1.149	2.368	E	E	D	-	E	E	E	-	E	D	D	C	F	E	E	D
46 = 2068	24.741	1.255	1.183	2.438	E	E	D	-	E	E	E	-	E	E	D	C	F	E	E	E
47 = 2069	25.484	1.293	1.219	2.512	E	E	D	-	E	E	E	-	E	E	D	C	F	E	E	E
48 = 2070	26.248	1.332	1.256	2.588	E	E	E	-	E	E	E	-	E	E	D	C	F	E	E	E
49 = 2071	27.036	1.372	1.293	2.665	E	E	E	-	E	E	E	-	E	E	E	C	F	E	E	E
50 = 2072	27.847	1.413	1.332	2.745	E	E	E	-	E	E	E	-	E	E	E	D	F	E	E	E

Fonte: O autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nesta dissertação permitiram demonstrar melhorias na condição operacional de rodovias de pista simples tendo a implantação de faixas adicionais e rodovia 2+1 com alternativa à duplicação. Com base na análise da demanda e infraestrutura de um trecho experimental, foi possível atingir os objetivos propostos, destacando: i) períodos expressivos de melhoria do nível de serviço com a instalação de faixas adicionais e rodovias 2+1, possibilitando postergar uma a duplicação da rodovia; ii) diferenças significativas na determinação dos níveis de serviço em rodovias de pista simples, para o atingimento do mesmo NS, comparando a utilização do novo método do HCM (TRB, 2022) em relação ao método anterior (TRB, 2016).

6.1 Premissas consideradas

Para o desenvolvimento desta dissertação, foram considerados dados de demanda e infraestrutura de um trecho experimental com a extensão de 48,37 km na Rodovia BR-163/MT, compreendido entre o km 358,52 (Várzea Grande/MT) e o km 406,89 (Jangada/MT), sob concessão da Rota do Oeste. Ao todo, foram cadastradas 105 rampas verticais e 45 curvas horizontais e 129 transições de zonas de ultrapassagem permitida e proibida determinadas pela Linha de Divisão de Fluxos Opostos (LFO), resultando em 124 segmentos homogêneos. O volume de tráfego no ano de 2022 foi de 6.352 veic./dia, com aproximadamente 75% de tráfego comercial na composição da frota, com participação expressiva de veículos de 7 ou mais eixos. O fator K considerado corresponde ao critério da 50ª hora de projeto (0,091 para o sentido Norte e 0,084 para o Sentido Sul). O período de projeto para avaliação das intervenções de ampliação de capacidade foi de 50 anos, sendo utilizada a taxa de crescimento de 3% a.a. para a projeção dos volumes de tráfego.

Neste trabalho, foram consideradas as seguintes intervenções de ampliação de capacidade para rodovias de pista simples: i) faixa adicional; ii) solução tipo “2+1”; e, iii) duplicação. As intervenções foram indicadas nos locais que apresentaram o pior nível de serviço na condição sem projeto, observando o espaçamento mínimo entre faixas adicionais existentes ou projetadas, considerado como 3 km, menor distância recomendada por Austroads (2021), e a extensão das faixas adicionais projetadas 1,60 km, maior distância recomendada por AAHSTO (2018) para fluxos direcionais entre 400 e 700 veic./h.

Ainda em relação as faixas adicionais e rodovias 2+1, observou-se que, de maneira geral, a implantação desses dispositivos em segmentos de ultrapassagem proibida (LFO-01: Linha Simples Contínua) em detrimentos de segmento com ultrapassagem permitida (LFO-02: Linha Simples Seccionada; LFO-03: Linha Dupla Contínua; LFO-04: Linha Contínua / Seccionada; e MRF: Linha Dupla Seccionada) apresenta melhores resultados.

Para a determinação dos níveis de serviço, optou-se pela aplicação das duas últimas edições do *Highway Capacity Manual* (HCM 2022 e HCM 2016), por meio da programação em Python e utilização do *Highway Capacity Software - HCS*.

6.2 HCM 2016

Uma das principais dificuldades para aplicação do método preconizado pelo HMC 2016 para a determinação dos níveis de serviço é a classificação do relevo da região. Conforme expostos nas seções 2.1.2 e 2.1.3, apenas DER (2012), Kerali *et al.* (2010) e Senço (2008) apresentaram critérios numéricos para esta classificação. Uma vez que DNER (1999) cita como limite para operação de uma rodovia arterial de pista simples o NS “C” para regiões planas e levemente onduladas e o NS “D” para regiões montanhosas e fortemente onduladas, sem referência do nível de serviço limite para regiões onduladas, esse assunto torna-se extremamente importante para a determinação dos níveis de serviço.

Buscando dirimir dúvidas nesse sentido, optou-se por determinar os níveis de serviço para o HCM 2016 considerando em um cenário o relevo como plano e em outro cenário o relevo como ondulado. Os resultados obtidos apontaram que o enquadramento do relevo entre plano e ondulado pode gerar uma diferença de até 1 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.

6.3 HCM 2022

Um primeiro aspecto a se observar ao se aplicar o método do HCM 2022 está relacionado a existência de duas classes distintas 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 regulamentada 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.

Os resultados obtidos apontaram que a classificação da velocidade regulamentada entre 80 km/h e 81 km/h pode gerar uma diferença de até 1 nível de serviço. Trechos com a velocidade regulamentada de 80 km/h apresentam resultados que demoram em média 6 anos para se equivalerem aos resultados obtidos para trechos com velocidade regulamentada de 81 km/h.

Ao longo do trabalho, foi possível notar que os critérios de segmentação propostos pelo HCM 2022 resultam em um número de segmentos homogêneos consideravelmente elevados, sobretudo em função da transição dos segmentos de ultrapassagem proibida e permitida. Isso faz com que uma mesma rampa ou rampas sucessivas sejam divididas em rampas com a mesma declividade, porém com extensões menores.

Os resultados obtidos aplicando o HCM 2022 indicaram que as faixas adicionais podem promover a melhoria de 1 nível de serviço, perdurando pelo período de 7 a 10 anos, até serem superadas pelo crescimento do tráfego. Da mesma forma, as rodovias 2+1 podem melhorar a condição operacional significativamente durante 16 anos, dispensando a duplicação da rodovia nesse período.

6.4 HCM 2016 x HCM 2022

Uma das principais dificuldades encontradas para a comparação dos resultados das intervenções de ampliação de capacidade entre o HCM 2022 e HCM 2016 está relacionada a segmentação. Observando os critérios de segmentação previstos em ambos os manuais, foi possível constatar que o trecho experimental com extensão de 48,37 km pode ser subdividido em 17 segmentos homogêneos considerando os preceitos do HCM 2016. Considerando os preceitos do HCM 2022, este mesmo trecho passa a ser subdividido em 124 segmentos homogêneos, mesmo já considerando as ponderações das rampas sucessivas. Dessa forma, a indicação de soluções como faixa adicional e rodovia 2+1 levou em consideração a localização das intervenções determinadas com a aplicação do HCM 2022, justamente por apresentar uma segmentação mais detalhada.

Portanto, em relação a comparação dos resultados dos níveis de serviço entre o HCM 2022 e HCM 2016, foi possível observar uma diferença de dois graus do nível de serviço para melhor no HCM 2022 se comparado ao HCM 2016. 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 determinado com o HCM2022 passa ser o mesmo nível de serviço determinado utilizando o HCM 2016 próximo do 20º ano de projeto.

O método do HCM 2022 possui apenas a velocidade média como parâmetro afetado pelo percentual de veículos pesados na frota, sendo pouco sensível no caso do trecho experimental mesmo com a composição de aproximadamente 75% de veículos pesados na frota. Esse pode ser um dos motivos para a diferença significativa para a obtenção dos níveis de serviço.

6.5 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise de intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples considerando trechos distintos, com variação na demanda, participação de veículos pesados e infraestrutura. A inclusão de aspectos relacionados à análise econômica como auxílio para tomada de decisão da intervenção com melhor custo-benefício baseada em parâmetros operacionais como os níveis de serviço também representaria uma importante contribuição, à exemplo dos estudos desenvolvidos por Bai et al. (2017), Melo e Setti (2007), Polus e Pollatschek (2004), e Taylor & Jain (1991).

Sob o ponto de visto do HCM 2022, trabalhos que possam contribuir para resolução de algumas questões levantadas nesta dissertação, como a dificuldade de se comparar intervenções de ampliação de capacidade pela segmentação diferente por sentido, elevado número de segmentos e subsegmentos em função da combinação de fatores como curva vertical, curva horizontal e zonas de ultrapassagem proibida / permitida. Outro aspecto observado trata-se da ponderação das curvas verticais, buscando avaliar o impacto nos resultados da ponderação de rampas sucessivas, resultando em curvas verticais com maior extensão e menor declividade, alterando a classe vertical. A questão das Linha de Divisão de Fluxos Opostos (LFO) alternando a oferta de ultrapassagem por sentido, resultando em um número elevado de segmentos com reduzida extensão é um caso que merece atenção, tendo em vista a prática comum de oferta de ultrapassagem para um mesmo segmento em rodovias de pista simples por meio três fases sucessivas: i) para o sentido de análise; ii) para ambos os sentidos; iii) para o sentido contrário.

Por último, os impactos da diferença de anos para obtenção de um mesmo nível de serviço considerando o método do HCM 2022 se comparado ao HCM 2016 também representa um assunto de grande relevância.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2010) *User and Non-User Benefit Analysis for Highways*. Washington, DC.

AASHTO (1994) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC.

AASHTO (2011) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC.

AASHTO (2018) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, DC. E-book.

Al-kaisy, A.; Freedman, Z. (2011) *Empirical Examination of Passing Lane Operational Benefits on Rural Two-Lane Highways*. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 16, p. 340-351. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.455>

Andrade, G. R.; Barbosa, S. H; Ferreira, M. V. S; F. A. C. P. (2013) Distribuição de volumes horários de tráfego e hora de projeto em rodovias.

Andrade, G. R.; Barbosa, Setti. J; R, (2015) Método para caracterização e classificação de trechos homogêneos rodoviários.

ANTT (2007). Programa de exploração rodoviária. Agência nacional de transportes terrestres. Anexo III edital de concessão 005/2007. Brasília.

ANTT (2017). Parecer técnico nº 799/2017/GEPRO/SUINF. Agência nacional de transportes terrestres. 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, v 143
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JTEPBS.0000065>

Bergh, T.; Remgard, M.; Carlsson, A.; Olstam, J.; Strömgren, P. (2016) *2+1-roads Recent Swedish Capacity and Level-of-Service Experience*. *Transportation Research Procedia*, 15, p. 331-345. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.028>

Bessa Jr., J. E. (2015) 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.

Bessa Jr, J. E. e J. R. Setti (2018) Evaluating measures of effectiveness for quality-of-service estimation on two-lane rural highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, v. 144, n. 9, <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000178>

Bloomberg, P. E. (2010) *A Preliminary Assessment of the 2010 HCM Weaving Methodology*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, p. 131-138. <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*, nº: 988, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 38-47.

Campos, V. B. G. (2013) Planejamento de transportes: conceitos e modelos. Rio de Janeiro. Interciência.

CNT. Pesquisa CNT de Rodovias. (2022) Relatório Gerencial. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. Disponível em:< <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo> >. Acesso em: 23/11/2022

Coutinho, A. H. M. (2020) Reprogramação de investimentos em contratos de parceria: solução para as concessionárias de rodovia da 3ª etapa do PROCROFE? Dissertação (Mestrado Escala de Direito de São Paulo) Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP.

Cunha, A. L. e Setti, J. R. (2009) Fatores de equivalência para caminhões em rodovias de pista dupla. Anais VI Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Florianópolis, SC.

- D'Avila, R. F.; Barbosa, H. M. (2015) Metodologia para definição de segmentos homogêneos em rodovias de pista simples. Anais 29º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET.
- DER (2012) Manual básico de estradas e rodovias vicinais - volume 1 - planejamento, projeto, construção e operação. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. Sistema rodoviário Anhanguera / Bandeirantes.
- DER (2018) Edital de licitação nº 007/CIC/97. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. Sistema rodoviário Anhanguera / Bandeirantes.
- DNER (1997) Glossário de Termos Técnicos Rodoviários. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1999) Manual de projeto geométrico de rodovias rurais. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- 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.
- DNIT (2006b) Manual de estudos de tráfego. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Brasília, DF.
- DNIT (2020) Edital RDC Eletrônico nº 291/2020-00. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. BR-470/RS, km 89,00 ao km 153,50. Brasília, DF.
- DNIT (2021) Índices de Reajustamentos de Obras Rodoviárias. 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.
- Elefteriadou, L. (2014) *An Introduction to Traffic Flow Theory.* Gainesville, FL; Springer.
- FDOT (2015) Flexible and Rigid Pavement Design Manual. Office of Design, Pavement Management Section, Florida Department of Transportation.

- FDOT (2017) *Level of service targets for the state highway system. Florida Department of Transportation*, Topic No.: 000-525-006-c.
- FDOT (2020) *Quality Level of Service Handbook*. Florida Department of Transportation. Tallahassee, FL.
- FHWA (1985) *Passing lanes and other operational improvements on two-lane highways. Federal Highway Administration*, McLean, VA.
- FHWA (2016) *Level of Service on the National Highway System. Federal Highway Administration, Memorandum*.
- Gattis, J. L.; Bhave, R.; Duncan, L. K. (2006) *Alternating Passing Lane Lengths. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1961, p. 16-23. <https://doi.org/10.1177/0361198106196100103>
- Gonze, N. C. (2014) *Concessão em rodovias federais: uma análise da evolução dos modelos de regulação técnica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- Harwood, D. W.; Hoban, C. J.; Warren, D. L. (1988) *Effective use of passing lanes on two-lane highways*. *Transportation Research Record*, 1.195.
- Harwood, D. W.; Coakley, R. C.; Polk, C. (2021) *Guidelines for integrating safety and cost-effectiveness into resurfacing, restoration, and rehabilitation (3r) projects. National Cooperative Highway Research Program NCHRP*, Report 876. Washington, DC.
- HIDOT (2002). *Pavement Design Manual*. Highways Division, Hawaii Department of Transportation.
- HSM (2010). *Highway Safety Manual (HSM)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1st. ed. Washington, DC. E-book.
- ITE (2016) *Institute of Transportation Engineers. Transportation Planning Handbook*. New Jersey. E-book.
- Jafari, A.; Al-Kaisy, A. (2018) *Investigation of side-by-side passing lane length and spacing on two-lane highways. International Journal XLVI*.

- Jain, M. P.; Mane, A.; Arkatkar, S. S.; Joshi, G. J. (2019) *Capacity estimation on two lane hilly roads under heterogeneous traffic condition in India. Transportation Research Procedia*, 48, p. 3.197-3.210. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.161>
- Kamplimath, H. M.; Varuna, M. (2013) *Traffic growth rate estimation using transport demand elasticity method: a case study for national highway-63. I-manager's Journal on Civil Engineering*, 3. <http://10.15623/ijret.2013.0213026>
- Kerali, H. G. R.; Odoki, J. B.; Stannard, E. E. (2010) *Highway Development & Management HDM-4 - Applications Guide*. World Road Association.
- Klein, F. C. (2005) *Análise da influência de características geométricas de rodovias nos custos dos usuários utilizando o programa HDM-4*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos.
- Liu, C; Wang, Z. (2017) *Passing Segment Length Determination on Two-Lane Highways. Transportation Research Procedia*, 25, p. 491-496. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.094>
- Mannering, F. L.; Washburn, S. S. (2013) *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*.
- Martins, C. A.; Silva, B. A.; Marques, M. E. S. (2018) *Definição de segmentos homogêneos para o trecho da BR-040 que compreende a cidade de Congonhas/MG*. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 9, n. 5. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0014>
- May, A. D. (1991) *Traffic performance and design of passing lanes*. *Transportation Research Record* 1303.
- MDOT (2012). *Pavement Design and Selection*. Construction Field Services Division, Michigan Department of Transportation.
- Melo, R. A.; Setti, J. R. (2007) *Fluxos mínimos de veículos para implantação de faixas adicionais em aclives de rodovias de pista simples*. *Transportes*, v. XV, n. 1, p. 16-23. <https://doi.org/10.14295/transportes.v15i1.43>

- Memmott, J. L. (1983) *Factors that affect traffic growth rates and projection of traffic volumes for use in highway economic models. Transportation Research*, 912, p. 11-15.
<http://worldcat.org/isbn/309035554>
- Metz, D. (2021) *Economic benefits of road widening: Discrepancy between outturn and forecast. Transportation Research Part A*, 147, p. 312-319.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.03.023>
- Mon-Ma, M. L. (2008) Adaptação do HCM-2000 rodovias de pista simples com faixas adicionais típicas do estado de São Paulo. Doutorado em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- NCHRP (2023) *Reliability and Quality of Service Evaluation Methods for Rural Highways. National Cooperative Highway Research Program NCHRP 08-135*. Disponível em:<<https://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=4747>>. Acesso em: 19/07/2023.
- NDOR (2010) *Rules and Regulation of the Board of Public Roads Classifications and Standards. Nebraska Department of Roads*. Omaha, NE.
- Novaes, A. G. (1982) Modelos em Planejamento Urbano, Regional e de Transportes. São Paulo, SP; Editora Edgard Blucher Ltda.
- 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. *Revista Transportes - ANPET*.
<https://doi.org/10.14295/transportes.v30i3.2690>
- Pereira, H. M. (2018) Sistema de suporte à decisão para priorização de investimentos em rodovias utilizando inteligência geográfica. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Pereira, H. M. e J. E. Bessa Jr. (2017) Análise comparativa de métodos para cálculo do nível de serviço em rodovias de pista simples. Anais XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, RJ

- Pipicano, E. F. M.; Vieira, S. S. (2018) Processos utilizados pelo DNIT para coleta de dados necessários para a calibração e aferição do modelo HDM-4 às condições das rodovias brasileiras. Anais 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET.
- Polus, A.; Reshetnik, I. (1987) *Impact of passing-climbing lanes on traffic flow on upgrades. Transportation Research Part A: General*, 21, p. 401-410. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(87\)90029-X](https://doi.org/10.1016/0191-2607(87)90029-X)
- Polus, A.; Pollatschek, M. A. (2004) *Criteria for widening of two-lane rural highways. Transport Policy*, 11, p. X-X. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.06.001>
- Roess, R. P.; Prassas, E. S.; McShane W. R. (2011) *Traffic Engineering. Upper Saddle River, NJ; Pearson.*
- 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, p. 3.209-3.217. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.263>
- Santos, T. S; Ribeiro, P. C. M. (2018) Análise de desempenho de rodovias concedidas por meio da capacidade e do nível de serviço. XVI Rio Transportes. Rio de Janeiro, RJ.
- Senço, W. (2008) Manual de técnicas de projetos rodoviários. São Paulo. Pini.
- Senna, L. A. S. (2014) Economia e planejamento dos transportes. Rio de Janeiro. Elsevier.
- Silva, G. S. (2017) Microsimulação para avaliação de desempenho operacional da duplicação de uma rodovia: caso da BR-365. Dissertação (Mestrado Faculdade de Engenharia Civil) Universidade Federal de Uberlândia, MG.
- 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.
- SNV (2019) Sistema Nacional de Viação. Disponível em: < <http://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr> >. Acesso em: 24/10/2022
- TCU (2016). Instrução técnica TC 032.829/2016-7. Tribunal de contas da união. Brasília.

- TRB (1985) Highway Capacity Manual, Special Report 209. Transportation Research Board. National Research Council.
- 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.
- Taylor, W. C.; Jain, M. K. (1991) *Warrants for passing lanes. Transportation Research Record*. 1303. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.048>
- TxDOT (2001) *Design guidelines for passing lanes on two-lane roadways (super 2)*. Texas Department of Transportation, Report 4064-1, Austin, TX.
- Utamura, F. S., J. R. Setti, C. Y. Egami and M. L. Mon-Ma (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.
- Valencia-Alaix, G.; Garcia, A. (2016) *Climbing Lane Level of Service Estimation in Spain. Transportation Research Procedia*, 11, p. 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.048>
- Valencia-Alaix, G.; García, A. G. (2019) *Operational Evaluation of Climbing Lanes on Steep Grades and Heavy Trucks. Transportation Research Procedia*, 48, p. 840-849. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.094>
- 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.
- Wooldridge, M. D.; Messer, C. J.; Heard, B. D.; Raghupathy, S.; Parham, A. H.; Brewer, M. A; Lee, S. (2002) Super 2 highways: two-lane rural highways with passing lanes. *Project 4064: Design Criteria for Improved Two-Lane Section (Super 2)*. Texas Department of Transportation (TxDOT).

Wooldridge, M. D.; Fitzpatrick, K.; Harwood, D. W.; Potts, I. B.; Elefteriadou, L.; Torbic, D. J. (2003) *Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roadways*. National Cooperative Highway Research Program NCHRP, Report 502. Washington, DC.

APÊNDICE “A”

Neste Apêndice, são apresentados os códigos em python desenvolvidos para processar os níveis de serviço no HCS 2022.

```
# -*- coding: utf-8 -*-  
  
# Algoritmo Desenvolvido por Igor Vieira Santos em 16/12/2022  
  
#=====
```

#Imports

```
# Importante o Módulo locale para alterar a codificação dos pontos e vírgulas  
import locale  
  
locale.setlocale( locale.LC_ALL,'pt_BR.UTF-8')
```

Importante o Módulo Pathlib para que os Caminhos dos Arquivos sejam Multiplataforma

```
import pathlib as pl
```

Importando Dados dos Segmentos (MS_Excel)

```
import pandas as pd
```

Importando Dados Arquivo XML

```
import xml.etree.ElementTree as Et
```

Importante o Módulo subprocess para abrir o HCS7

```
import subprocess
```

Importante o Módulo PyAutoGui

```
import pyautogui
```

Importante o Módulo Time

```
import time
```

```
# Importante o Módulo Datetime
```

```
from datetime import date
```

```
#=====
```

```
#Classe Análise Níveis de Serviço Sem Projeto
```

```
class Sem_Projeto_Sete:
```

```
    def __init__(self, entrad, nomeplan, situac, velreg, sentid, saida):
```

```
        # entrad = Caminho (Diretório) do Arquivo Contendo os Dados de Entrada para o Rodar o HCS
```

```
        # nomeplan = Nome da Planilha que Contem os Dados de Entrada para o Rodar o HCS
```

```
        # situac = Situação de Análie (Sem Projeto ou Com Projeto )
```

```
        # velreg = Velocidade Regulamentada (80 km/h ou 81 km/h)
```

```
        # sentid = Sentido de Análise (Norte ou Sul)
```

```
        # saida = Parte do Caminho (Diretório) para Salvar o Arquivo Contendo os Dados de Saída após Rodar o HCS
```

```
#=====
```

```
# Parâmetros
```

```
Arquivo_xlsx = pl.Path(entrad)
```

```
Planilha = pd.read_excel (Arquivo_xlsx, sheet_name = nomeplan)
```

```
Situacao = situac
```

```
Vel_Regulamentada = velreg
```

```
Sentido = sentid
```

```
Arquivo_Resultados = pl.Path(saida)
```

```
Executavel_HCS7 = pl.Path("C:\\Program Files (x86)\\McTrans\\HCS\\Highways.exe")
```

```
Ano = 2022 #Ano de Abertura
```

```
Tx = 0.03 #Taxa de Crescimento Anual

Analise_Los = 0 # Variável para Determinar o Melhor NS de Cada Segmento (Condição para Estrutura de
Repetição)

Delta_Ano = 0 # Variável Utilizada para Projeção dos Volumes de Tráfego

#=====

#Coleções

Dados_Entrada = [] # Lista de Dados de Entrada

Dados_Saida = [] # Lista de Dados de Saida (Ano a Ano)

Resultados_Globais = [] # Lista de Dados de Saida (Todos os Anos)

v_c = []

Speed = []

Speed_km = []

Followers = []

Density = []

Density_km = []

Los = []

Tempo = []

Facility = []

Projeto = [] #Lista para correção da nomenclatura das linhas nas dataframes de output

SegmentNames = [] #Lista para correção da nomenclatura das colunas nas dataframes de output

Nomes_Facility = [] # Lista para correção da nomenclatura das colunas nas dataframes de output

Nomes_Entrada = [] # Lista para correção da nomenclatura das colunas nas dataframes de output

Result_v_c = []

Result_Speed = []

Result_Speed_km = []

Result_Followers = []

Result_Density = []
```

```

Result_Density_km = []

Result_Los = []

Result_Tempo = []

#=====

#Dados de Entrada (Passo 1)

#Estabelecendo Variáveis de Registro do Tempo e o Número de Segmentos Objeto de Análise

start_time = time.time()

linhas = Planilha[Planilha.columns[0]].count() # Definindo o Número de Linhas Preenchidas na Primeira
Coluna da Planilha

Segmentos = int(Planilha ["Seg." ] [linhas-1])# Determinando o Número de Segmentos

#while int(Analise_Los) <= int(Segmentos):

for igor in range (51):

    Analise_Los = 0 # Resetando Variável Análise LOS

    #=====

    # Criando Arquivo XML (Passo 2)

    Xml_NS = pl.Path("%s\\%s\\%s\\%s\\%s_%s_%d_%d_Segmentos.xuf" % (Arquivo_Resultados,
    Situacao, Vel_Regulamentada, Sentido, nomeplan, Sentido, Ano, linhas))

    HCS_file = open( Xml_NS, "w" )

    HCS_file.write( "<?xml version='1.0' encoding='utf-8'?'>\n" )

    HCS_file.write( "<TMML>\n" )

    HCS_file.write( " <Program>HCS Highways Version 8.1</Program>\n" )

    HCS_file.write( " <IsFacilityAnalysis>true</IsFacilityAnalysis>\n" )

    HCS_file.write( " <AnalysisType>TwoLaneHighway</AnalysisType>\n" )

    HCS_file.write( " <IsMetricSystem>true</IsMetricSystem>\n" )

    HCS_file.write( " <ProjectData>\n" )

    HCS_file.write( " <Analyst>Igor Vieira</Analyst>\n")

```

```

HCS_file.write( " <Agency>Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG</Agency>\n" )
HCS_file.write( " <Jurisdiction>Federal (BR-163/MT km 358,52 - km 407,16)</Jurisdiction>\n" )
HCS_file.write( " <ProjectDescription>Dissertacao de Mestrado</ProjectDescription>\n" )
HCS_file.write( " <AnalysisYear>%d</AnalysisYear>\n" % Ano)
HCS_file.write( " <Date>%s</Date>\n" % (date.today()))
HCS_file.write( " <TimePeriodAnalyzed>%d Anos</TimePeriodAnalyzed>\n" % Delta_Ano)
HCS_file.write( " </ProjectData>\n" )

```

```

HCS_file.write( " <Facility>\n" )

```

```

HCS_file.write( " <SegmentsGlobalInput></SegmentsGlobalInput>\n" )

```

```

HCS_file.write( " <SegmentList>\n" )

```

```

#=====

```

```

#Dados de Entrada (Passo 3)

```

```

#Percorre os Segmentos da Planilha de Excel Preenchendo as Variáveis

```

```

Dados_Entrada = [] # Resetando variável dados de entrada

```

```

for i in range (linhas):

```

```

    Indice = int(Planilha ["Nº"] [i]) # Número do Segmento

```

```

    Segmento = round((Planilha ["Seg."] [i]),2) # Número do Segmento Considerando Subsegmentos

```

```

    Geometria = (Planilha ["Geometria\n(%)s" % (Sentido)] [i]) # Tipo de Segmento (Passing
Constrained, Passing Zone ou Passing Lane)

```

```

    km_i = round((Planilha ["km_i"] [i]),2) # km Inicial Segmento

```

```

    km_f = round((Planilha ["km_f"] [i]),2) # km Inicial Segmento

```

```

    Extensao = round((Planilha ["Extensão\n(ft)"] [i]),2) # Extensão do segmento em milhas (ft)

```

```

    Extensao_km = round((Planilha ["Extensão\n(km)"] [i]),2) # Extensão do segmento em milhas (km)

```

Regulamentada = round((Planilha ["Veloc._Diretriz\nNorte e Sul\n(mi/h)"] [i]),2) # Velocidade Regulamentada (mi/h)

Regulamentada_km = round((Planilha ["Veloc._Diretriz\nNorte e Sul\n(km/h)"] [i]),2) # Velocidade Regulamentada (km/h)

VMD = round(Planilha ["VMD\n(veic/dia)"] [i] * ((1 + Tx)**Delta_Ano)) # VMD (veic/dia)

Vd = round(Planilha ["Vol._Direcional\n%s\n(veic/h)" % (Sentido)] [i] * ((1 + Tx)**Delta_Ano)) # Volume fluxo direcional (veh/h)

Vo = round(Planilha ["Vol._Oposto\n%s\n(veic/h)" % (Sentido)] [i] * ((1 + Tx)**Delta_Ano)) # Volume fluxo oposto (veh/h)

PHF = round((Planilha ["FHP\n%s" % (Sentido)] [i]),2) # Fatos Horário de Pico - FHP

Pt = round((Planilha ["Veículos Pesados\n%s\n(Percent.)" % (Sentido)] [i]),2) # Percentagem de caminhões na fota (decimal)

Lfaixa = round((Planilha ["L_Faixa\n%s\n(ft)" % (Sentido)] [i]),2) # Largura da Faixa de Rolamento (ft)

Lacost = round((Planilha ["L_Acost.\n%s\n(ft)" % (Sentido)] [i]),2) # Largura do Acostamento (ft)

Grade = round((Planilha ["Greide\n%s" % (Sentido)] [i]),2) # Declividade da Rampa (%)

Acessos = round((Planilha ["Densidade\nAcessos\n%s\n(Aces./mi)" % (Sentido)] [i]),2) # Densidade de Acessos (acessos/mi)

Tracado = (Planilha ["Traçado"] [i]) # Traçado Horizontal (Tangente ou Curva)

Raio = round((Planilha ["Raio\n(ft)"] [i]),2) # Raio da Curva (ft)

Raio_m = round((Planilha ["Raio\n(m)"] [i]),2) # Raio da Curva (m)

Superelevacao = round((Planilha ["Superelevação\n(%)"] [i]),1) # Superelevação da Curva (%)

#Variável para Correção da Variável i impedindo busca do Segmento O no Arquivo XML, tendo em vista que a variável i do for se inicia no 0

ii = i+1

#Análise se a Próxima Linha (Índice) Trata-se de um Segmento ou SubSegmento

Seg = int(str(Segmento).split(".")[0])

SubSeg = int(float(str(Segmento).split(".")[1]))

NextSegmento = round((Planilha ["Seg."] [ii]),2) # Número do Próximo Segmento Considerando Subsegmentos

NextSeg = int(str(NextSegmento).split(".")[0]) # Número do Segmento Desconsiderando Subsegmentos

```

NextSubSeg = int(float(str(NextSegmento).split(".")[1])) # Número do Subsegmento Pertencente ao
Segmento

NSubSeg = 1

iii = ii

#Identificação do Número de Subsegmentos em cada Segmento

while (Seg == NextSeg) and (NextSegmento != 0): #Análise do Número de SubSegmentos

    NextSegmento = round((Planilha ["Seg." ] [iii]),2) # Número do Próximo Segmento Considerando
Subsegmentos

    NextSeg = int(str(NextSegmento).split(".")[0]) # Número do Segmento Desconsiderando
Subsegmentos

    NextSubSeg = int(float(str(NextSegmento).split(".")[1])) # Número do Subsegmento Pertencente ao
Segmento

    iii = iii + 1 # iii = iii + NSubSeg

    NSubSeg = NSubSeg + 1

    UltimoSubseg = NSubSeg

#Determinando o número de Subsegmento por meio da igualdade entre as variáveis NSubSeg e
NextSubseg

#print("| ii = ",ii, "| iii =", iii,"| Seg = ", Seg,"| SubSeg = ", SubSeg,"| NextSeg = ", NextSeg,"|
NextSubSeg = ", NextSubSeg,"| NSubSeg = :",NSubSeg,"| ",Extensao_km, "\n")

# Escrevendo Arquivo XML para os Segmentos Objeto de Análise

if SubSeg <= 1:

    # Corrigindo a Extensão dos Segmentos que Possuem Subsegmentos

    for a in range (NSubSeg-1) [1:]:

        Extensao = round(Extensao + (Planilha ["Extensão\n(ft)"] [i + a]),2)

        Extensao_km = round(Extensao_km + (Planilha ["Extensão\n(km)"] [i + a]),2)

        #print("i = ",i, "| a =", a,"| Extensao =", Extensao,"| Extensao_km =", Extensao_km,"\n")

        km_f = km_i + (Extensao_km)

    Dados_Entrada.append( [Indice, Seg, NSubSeg - 1, km_i, km_f,Extensao_km, Extensao, Geometria,
Tracado, Raio_m, Raio,

```

Superelevacao, Grade, Regulamentada_km, Regulamentada, Vd, Vo, PHF, Pt, Lfaixa,
Lacost, Acessos])

```

HCS_file.write( "    <Segment SegmentNumber=\"%d\">\n" % Seg)

HCS_file.write( "    <SegmentName>%d.%d</SegmentName>\n" % (Seg, NSubSeg - 1)) # Criar
Nomenclatura do Segmento

HCS_file.write( "
<SegmentTypeAnalysisInFacility>TwoLaneHighway</SegmentTypeAnalysisInFacility>\n")

HCS_file.write( "    <SegmentTypeInput>Basic</SegmentTypeInput>\n")

HCS_file.write( "
<SegmentTypeUsedInAnalysis>TwoLaneHighway</SegmentTypeUsedInAnalysis>\n")

HCS_file.write( "    <MainGeometricData>\n")
HCS_file.write( "        <Length>%0.02f</Length>\n" % Extensao)
HCS_file.write( "        <Terrain>Grade</Terrain>\n")
HCS_file.write( "        <Grade>%0.02f</Grade>\n" % Grade)
HCS_file.write( "    </MainGeometricData>\n")

HCS_file.write( "    <TimePeriodData>\n")
HCS_file.write( "        <TimePeriodData TimePeriodNumber=\"%d\">\n" % ii)
HCS_file.write( "            <DemandInput>%d</DemandInput>\n" % Vd)
HCS_file.write( "            <PeakHourFactor>%0.02f</PeakHourFactor>\n" % PHF)
HCS_file.write( "            <TotalTruck>%0.02f</TotalTruck>\n" % (Pt * 100))
HCS_file.write( "        </TimePeriodData>\n")
HCS_file.write( "    </TimePeriodData>\n")

HCS_file.write( "    <BasicSegmentGeometricData>\n")
HCS_file.write( "        <LaneWidth>%0.02f</LaneWidth>\n" % Lfaixa)
HCS_file.write( "        <AccessPointDensity>%0.02f</AccessPointDensity>\n" % Acessos)
HCS_file.write( "        <IsMeasuredFreeFlowSpeed>>false</IsMeasuredFreeFlowSpeed>\n")
HCS_file.write( "        <SpeedLimit>%0.02f</SpeedLimit>\n" % Regulamentada)

```



```

HCS_file.write( "      <ShoulderWidth>%0.02f</ShoulderWidth>\n" % Lacost)
HCS_file.write( "      <CalculateBicycleLos>>false</CalculateBicycleLos>\n")
HCS_file.write( "      </BasicSegmentGeometricData>\n")

HCS_file.write( "      <TwoLaneHighwayData>\n")

# Parâmetros dos Segmentos de Ultrapassagem Proibida
if Geometria == "Passing Constrained":

    HCS_file.write( "
<TwoLaneHighwayType>PassingConstrained</TwoLaneHighwayType>\n")

    HCS_file.write( "
<AnalyzedTwoLaneHighwayType>PassingConstrained</AnalyzedTwoLaneHighwayType>\n")

# Parâmetros dos Segmentos de Ultrapassagem Permitida
elif Geometria == "Passing Zone":

    HCS_file.write( "      <TwoLaneHighwayType>PassingZone</TwoLaneHighwayType>\n")

    HCS_file.write( "
<AnalyzedTwoLaneHighwayType>PassingZone</AnalyzedTwoLaneHighwayType>\n")

# Parâmetros dos Segmentos com Faixa Adicional
elif Geometria == "Passing Lanes":

    HCS_file.write( "      <TwoLaneHighwayType>PassingLanes</TwoLaneHighwayType>\n")

    HCS_file.write( "
<AnalyzedTwoLaneHighwayType>PassingLanes</AnalyzedTwoLaneHighwayType>\n")

HCS_file.write( "      <TwoLaneHighwayGeometricData>\n")

if Tracado == "Curva" or NSubSeg >= 2:

    HCS_file.write( "      <IncludeHorizontalCurve>>true</IncludeHorizontalCurve>\n")

    HCS_file.write( "      <SubsegmentList>\n")

```

#Acrescentando a Geometria dos SubSegmentos

for a in range (NSubSeg - 1): # Incluindo a Geometria dos Subsegmentos nos Segmentos (Apenas para Segmentos que Possuem Subsegmentos)

if (Planilha ["Traçado"] [i + a]) == "Curva": # Verificando se a Geometria do SubSegmento é em Curva ou Tangente

HCS_file.write(" <SubsegmentGeometricData>\n")

HCS_file.write(" <SubsegmentType>HorizontalCurve</SubsegmentType>\n")

HCS_file.write(" <Radius>%0.02f</Radius>\n" % round((Planilha ["Raio\n(ft)"] [i + a]),2))

HCS_file.write(" <Superelevation>%0.02f</Superelevation>\n" % round((Planilha ["Superelevação\n(%)"] [i + a]),1))

HCS_file.write(" <CurveLength>%0.02f</CurveLength>\n" % round((Planilha ["Extensão\n(ft)"] [i + a]),2))

HCS_file.write(" </SubsegmentGeometricData>\n")

else:

HCS_file.write(" <SubsegmentGeometricData>\n")

HCS_file.write(" <SubsegmentType>Tangent</SubsegmentType>\n")

HCS_file.write(" <Radius>3000</Radius>\n")

HCS_file.write(" <Superelevation>0</Superelevation>\n")

HCS_file.write(" <CurveLength>%0.02f</CurveLength>\n" % round((Planilha ["Extensão\n(ft)"] [i + a]),2))

HCS_file.write(" </SubsegmentGeometricData>\n")

HCS_file.write(" </SubsegmentList>\n")

else:

HCS_file.write(" <IncludeHorizontalCurve>>false</IncludeHorizontalCurve>\n")

HCS_file.write(" <SubsegmentList>\n")

HCS_file.write(" <SubsegmentGeometricData>\n")

HCS_file.write(" <SubsegmentType>Tangent</SubsegmentType>\n")

HCS_file.write(" <Radius>3000</Radius>\n")

```

HCS_file.write( "      <Superelevation>0</Superelevation>\n")
HCS_file.write( "      <CurveLength>5280</CurveLength>\n")
HCS_file.write( "      </SubsegmentGeometricData>\n")
HCS_file.write( "      </SubsegmentList>\n")

HCS_file.write( "    </TwoLaneHighwayGeometricData>\n")

HCS_file.write( "    <TwoLaneHighwayTimePeriodData>\n")
HCS_file.write( "      <TwoLaneHighwayTimePeriodData>\n")

if Geometria == "Passing Zone":
    HCS_file.write( "
<DemandVolumeOpposingDirection>%d</DemandVolumeOpposingDirection>\n" % Vo)
    elif Geometria != "Passing Zone":
        HCS_file.write( "
<DemandVolumeOpposingDirection>0</DemandVolumeOpposingDirection>\n")

HCS_file.write( "      <SubsegmentList>\n")
HCS_file.write( "      </SubsegmentList>\n")
HCS_file.write( "    </TwoLaneHighwayTimePeriodData>\n")
HCS_file.write( "    </TwoLaneHighwayTimePeriodData>\n")

HCS_file.write( "  </TwoLaneHighwayData>\n")
HCS_file.write( "  <WorkZoneTimePeriodData />\n")
HCS_file.write( "  </Segment>\n")

#Esta era a identificação anterior

HCS_file.write( "  </SegmentList>\n")
HCS_file.write( "  <SectionList></SectionList>\n")
HCS_file.write( "  </Facility>\n" )
HCS_file.write( "</TMML>\n" )

```

```

HCS_file.close()

#=====

#Interface com HCS7 (Passo 4)

#Abrindo HCS7, Inserindo Dados de entrada, Calculando NS e Salvando o Arquivo XML
subprocess.Popen ([Executavel_HCS7,Xml_NS])

time.sleep(25)

pyautogui.hotkey('ctrl', 's')

pyautogui.hotkey('alt', 'F4')

#=====

# Dados de Saída (Passo 5)

# Carregando o Arquivo XML Após o Cálculo dos Níveis de Serviço
time.sleep(3)

tree = Et.parse(Xml_NS)

root = tree.getroot()

#Armazenando os Resultados dos Níveis de Serviço para cada um dos Segmentos

SegmentNames= [] # Resetando a variável que elabora a lista para correção da nomenclatura das
colunas nas dataframes de output

for i in range(linhas):

    #Variável para Correção da Variável i impedindo busca do Segmento O no Arquivo XML, tendo em
vista que a variável i do for se inicia no 0

    ii = i+1

    for elm in root.findall("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']" %ii):

        SegmentName =
(root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/SegmentName" %ii).text)

```

```

vc =
round(float((root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/TimePeriodData/TimePeriodD
ata/DemandCapacityRatio" %ii).text)),2)

# V/C (Adimensional)

Velocidade =
round((float(root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/TimePeriodData/TimePeriodD
ata/AverageSpeed" %ii).text)),2)

# Average Speed (mi/h)

Velocidade_km = round(Velocidade * 1.609,2)

# Average Speed (km/h)

Pelotao =
round((float(root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/TwoLaneHighwayData/TwoL
aneHighwayTimePeriodData/TwoLaneHighwayTimePeriodData/PercentFollowerResults/PercentFollowers"
%ii).text)),2)

# Percent Followers (%)

if
(root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/TwoLaneHighwayData/TwoLaneHighway
Type" %ii).text) == "PassingLanes":

    Densidade =
round((float(root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/TwoLaneHighwayData/TwoL
aneHighwayTimePeriodData/TwoLaneHighwayTimePeriodData/MidPointFollowerDensity" %ii).text)),2)

else:

    Densidade =
round((float(root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/TwoLaneHighwayData/TwoL
aneHighwayTimePeriodData/TwoLaneHighwayTimePeriodData/AdjustedFollowersDensity" %ii).text)),2)

# Follower Density (followers/mi/ln)

Densidade_km = round(Densidade / 1.609,2)

# Follower Density (followers/km/ln)

LOS =
(round.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/TimePeriodData/TimePeriodData/Los"
%ii).text)

# Level of Service (Adimensional)

Time = round(Velocidade**(-
1)*round((float(root.find("./Facility/SegmentList/Segment[@SegmentNumber='%d']/MainGeometricData/Lengt
h" %ii).text))/5280,6)*60,2)

# Tempo determinado pelo inverso da velocidade (minutos)

#Preenchimento das Listas com os Resultados para cada Ano

```

```

Dados_Saida.extend( [ii, SegmentName, vc, Velocidade, Pelotao, Densidade, LOS] )

v_c.extend([vc])

Speed.extend ([Velocidade])

Speed_km.extend ([Velocidade_km])

Followers.extend ([Pelotao])

Density.extend ([Densidade])

Density_km.extend ([Densidade_km])

Los.extend ([LOS])

Tempo.extend([Time])

SegmentNames.extend ([SegmentName]) # Lista para correção da nomenclatura das colunas nas
dataframes de output

#Determinando Melhor Nível de Serviço como Condição para a Estrutura de Repetição While
#Enquanto Houver um Nível de Serviço Melhor que "F" para Qualquer Segmento o Código
Contuará a ser Executado Até que Todos os Segmentos Estejam no Nível de Serviço "F"

#NS = Analisa_Los(LOS)

if LOS == "F":

    Analise_Los = Analise_Los + 1

    if Analise_Los == Segmentos:

        Analise_Los = Segmentos + 1

#Armazenando os Resultados da Facility para cada Ano

VMT =
round((float(root.find("./Facility/FacilityResultList/FacilityTimePeriodResult/VehMilePerTimePeriod").text)),0)

# VMT (veh-mi/p)

VMT_km = round(VMT * 1.609,0)

# VMT (veh-km/p)

VHD =
round((float(root.find("./Facility/FacilityResultList/FacilityTimePeriodResult/VehDelayPerTimePeriod").text)),2
)

# VHD (veh-h/p)

```

```

Follower =
round((float(root.find("./Facility/FacilityResultList/FacilityTimePeriodResult/AverageFollowerDensity").text)),2
)

# Follower Density (followers/mi/ln)

Follower_km = round(Follower / 1.609,2)

# Follower Density (followers/mi/ln)

LOS_Facility =
(root.find("./Facility/FacilityResultList/FacilityTimePeriodResult/LosPerTimePeriod").text)

# Level of Service Ponderado Facility (mi)

Vd_Vo = Vd + Vo

Facility.append([VMD, Vd, Vo, Vd_Vo, VMT, VMT_km, VHD, Follower, Follower_km,
LOS_Facility])

print("Ano: %d NS: %s Segmentos: %d" %(Ano, Analise_Los, Segmentos))

Projeto.extend(["%d = %d" %(Delta_Ano, Ano)]) #Lista para correção da nomenclatura das colunas nas
dataframes de output

Delta_Ano = Delta_Ano + 1

Ano = Ano + 1

#Preenchimento das Listas com os Resultados para Todos os Anos

Resultados_Globais.append(Dados_Saida)

Result_v_c.append (v_c)

Result_Speed.append (Speed)

Result_Speed_km.append (Speed_km)

Result_Followers.append (Followers)

Result_Density.append (Density)

Result_Density_km.append (Density_km)

Result_Los.append (Los)

Result_Tempo.append (Tempo)

#Limpendo Conteúdo das Listas

v_c = []

```

```
Speed = []
```

```
Speed_km = []
```

```
Followers = []
```

```
Density = []
```

```
Density_km = []
```

```
Los = []
```

```
Tempo = []
```

```
#Criando listas para linhas de cabeçalho das dataframes
```

```
Nomes_Facility = ["VMD\n(veh./dia)", "Vd\n(veh/h)", "Vo\n(veh/h)", "Vd+Vo\n(veh/h)", "VMT\n(veh-  
mi/p)", "VMT\n(veh-km/p)",
```

```
"VHD\n(veh-h/p)", "Follower Density\nfollowers/mi/ln", "Follower Density\nfollowers/km/ln",  
"LOS"]
```

```
Nomes_Entrada = ["Nº", "Segmento", "Sub-Segmento", 'km_i', 'km_f', "Extensão\n(km)", "Extensão\n(ft)",  
"Geometria", "Tracado\nHorizontal",
```

```
"Raio\n(m)", "Raio\n(ft)", "Superelevacao\n(%)", "Graide\n(%)",
```

```
"Veloc._Diretriz\n(km/h)", "Veloc._Diretriz\n(mi/h)", "Vd\n(veh/h)", "Vo\n(veh/h)", "PHF",
```

```
"Pt\n(%)", "L_faixa\n(ft)", "L_Acost.\n(ft)", "D_Acessos\n(Aces./mi)"]
```

```
# Criando as Dataframes para Output
```

```
Plan0 = pd.DataFrame(Dados_Entrada, index = SegmentNames, columns = Nomes_Entrada)
```

```
Plan1 = pd.DataFrame(Result_v_c, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan2 = pd.DataFrame(Result_Speed, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan3 = pd.DataFrame(Result_Speed_km, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan4 = pd.DataFrame(Result_Tempo, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan5 = pd.DataFrame(Result_Followers, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan6 = pd.DataFrame(Result_Density, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan7 = pd.DataFrame(Result_Density_km, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan8 = pd.DataFrame(Result_Density_km, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```

```
Plan9 = pd.DataFrame(Result_Los, index = Projeto, columns = SegmentNames)
```



```

Plan10 = pd.DataFrame(Facility, index = Projeto, columns = Nomes_Facility)
Plan11 = pd.DataFrame(Facility, index = Projeto, columns = Nomes_Facility)

#Invertendo Dataframes

Plan1 = Plan1.T
Plan2 = Plan2.T
Plan3 = Plan3.T
Plan4 = Plan4.T
Plan5 = Plan5.T
Plan6 = Plan6.T
Plan7 = Plan7.T
Plan8 = Plan8.T
Plan9 = Plan9.T

# Desenvolvendo Dataframes para Determinar a Transição do NS

Plan11.drop_duplicates(subset='LOS', keep= 'first', inplace= True)

# Ordenando lanilha Densidade

extracted_col1 = Plan0['km_i']
extracted_col2 = Plan0['km_f']
extracted_col3 = Plan0['Extensão\n(km)']

Plan8 = Plan8.join(extracted_col1)
Plan8 = Plan8.join(extracted_col2)
Plan8 = Plan8.join(extracted_col3)

Plan8.sort_values(by = ['0 = 2022', 'Extensão\n(km)'], inplace = True, ascending = False)

Resul_Xlsx = pl.Path("%s\\%s\\%s\\%s\\%s_%s_%s_d_Segmentos.xlsx" % (Arquivo_Resultados, Situacao,
Vel_Regulamentada, Sentido, nomeplan, Sentido, linhas))

with pd.ExcelWriter(Resul_Xlsx) as writer:

```

```
Plan0.to_excel(writer, sheet_name="Dados_Entrada" )
Plan1.to_excel(writer, sheet_name="v_c" )
Plan2.to_excel(writer, sheet_name="Speed_(mi_h)")
Plan3.to_excel(writer, sheet_name="Speed_(km_h)")
Plan4.to_excel(writer, sheet_name="Tempo_(minutos)")
Plan5.to_excel(writer, sheet_name="Followers_(%)")
Plan6.to_excel(writer, sheet_name="Density_(followers_mi_ln)")
Plan7.to_excel(writer, sheet_name="Density_(followers_km_ln)")
Plan8.to_excel(writer, sheet_name="Density_(followers_km_ln)_Ordem")
Plan9.to_excel(writer, sheet_name="Los")
Plan10.to_excel(writer, sheet_name="Facility_(mi_km)")
Plan11.to_excel(writer, sheet_name="Transicao_Facility_(mi_km)")

#print(*Dados_Entrada, sep="\n")

print ("Tempo de Execução Módulo = %f segundos." % (time.time() - start_time))

if __name__ == "__main__":
    sem_projeto_sete = Sem_Projeto_Sete()
```