



**Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Civil**

Carlos Eduardo Figur

**Aplicação do método do HCM 6 para rodovias de múltiplas faixas em segmentos do
SNV abrangidos por postos de contagem do PNCT na BR-101 no estado de Santa
Catarina**

27 de junho de 2023

Carlos Eduardo Figur

Aplicação do método do HCM 6 para rodovias de múltiplas faixas em segmentos do SNV abrangidos por postos de contagem do PNCT na BR-101 no estado de Santa Catarina

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado pelo acadêmico Carlos Eduardo Figur à banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Professor orientador: Alexandre Hering Coelho, Dr.

27 de junho de 2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Figur, Carlos Eduardo

Aplicação do método do HCM 6 para rodovias de múltiplas faixas em segmentos do SNV abrangidos por postos de contagem do PNCT na BR-101 no estado de Santa Catarina / Carlos Eduardo Figur ; orientador, Alexandre Hering Coelho, 2023.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia de tráfego. 3. Nível de serviço. 4. HCM. 5. Rodovia de múltiplas faixas. I. Coelho, Alexandre Hering. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Carlos Eduardo Figur

Aplicação do método do HCM 6 para rodovias de múltiplas faixas em segmentos do SNV abrangidos por postos de contagem do PNCT na BR-101 no estado de Santa Catarina

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de junho de 2023

Prof. Liane Ramos da Silva, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.
Orientador

Prof. Eduardo Lobo, Dr.
Membro

Prof. Liseane Padilha Thives, Dra.
Membro

Agradecimentos

À minha mãe, Rosemari, e minha irmã, Amanda, por todo o amor, carinho e suporte durante todos esses anos e por nunca terem medido esforços para me fornecer o necessário para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

À minha tia, Ana Rosa, e minha prima, Beatriz, por terem me acolhido em Florianópolis desde o início da graduação e por toda a ajuda que me deram nos últimos anos.

Ao meu orientador, professor Alexandre, por todos os ensinamentos repassados durante a graduação, pela dedicação e pela excelência na orientação deste trabalho.

Aos engenheiros André Kretzer e Anderson Schmitt pelo apoio prestado durante a elaboração deste trabalho.

Aos amigos que fiz na infância e que fazem parte da minha vida até hoje, por todo o companheirismo.

À família Zolet, em especial à minha madrinha, Maria, por sempre terem acreditado no meu potencial e pelo conforto nos momentos mais delicados.

Ao LabTrans, pela oportunidade de trabalhar em projetos na área de transportes, pela convivência com os colegas de trabalho e por proporcionar experiências essenciais à minha formação.

Aos amigos que tive o prazer de conhecer na UFSC, Bruno, Chico, Lucas, Julia e Rafaela, pelos momentos vividos durante a graduação.

RESUMO

No gerenciamento da infraestrutura rodoviária, é preciso conhecer as características das vias relacionadas à infraestrutura e à demanda para verificar se estão aptas a cumprir com o nível de qualidade de serviço exigido, de modo a determinar o fluxo máximo que uma seção de rodovia é capaz de suportar. É necessária uma metodologia de cálculo do nível de serviço e capacidade das rodovias para identificar e fundamentar os investimentos na malha rodoviária. Os métodos mais utilizados para esse fim são trazidos pelo *Highway Capacity Manual*. Esse trabalho teve como objetivo realizar uma análise operacional para segmentos localizados na BR-101 em Santa Catarina, para os quais existem dados abertos disponíveis. Utilizando o método definido no HCM 6 para modelagem de rodovias de múltiplas faixas, dados de volume obtidos no Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) e os segmentos definidos no Sistema Nacional de Viação (SNV). Foi possível calcular o nível de serviço para o sentido crescente do fluxo de tráfego em cinco segmentos, e para o sentido decrescente, em quatro segmentos. Os resultados numéricos obtidos na aplicação do método foram apresentados em tabelas e o nível de serviço foi representado graficamente. Os *scripts* para verificação de completude mensal e anual e obtenção de dados podem ser utilizados para todos os dados disponíveis no PNCT. Foi possível calcular o nível de serviço para 23,3% da extensão total da rodovia.

Palavras-chave: engenharia de tráfego, nível de serviço; HCM 6; rodovia de múltiplas faixas; PNCT; SNV.

ABSTRACT

In the management of road infrastructure, it is necessary to know the characteristics of roadways related to infrastructure and demand to assess if they are capable of meeting the required level of service, in order to determine the maximum flow that a highway section can accommodate. A methodology to calculate the level of service and capacity of roadways is needed to identify and support investments in the road network. The most commonly used methods for this purpose are provided by the Highway Capacity Manual. This study aimed to perform an operational analysis for segments located on BR-101 in Santa Catarina, for which there are available open data. The method defined in HCM 6 for modeling multi-lane highways was utilized, with volume data obtained from the National Traffic Counting Plan (Plano Nacional de Contagem de Tráfego – PNCT) and the segments defined in the National Highway System (Sistema Nacional de Viação – SNV). It was possible to calculate the level of service for the increasing direction of traffic flow in five segments, and for the decreasing direction in four segments. The numerical results obtained from the application of the method were presented in tables, and the level of service was graphically represented. The scripts for monthly and annual completeness verification and data retrieval can be used for all available data in the PNCT. It was possible to calculate the level of service for 23.3% of the roadway total extension.

Key-words: traffic engineering, level of service, HCM 6, multilane highway, PNCT, SNV.

Lista de Figuras

1	Exemplos de rodovias de múltiplas faixas	5
2	Modelagem macroscópica da relação entre velocidade e fluxo de tráfego	7
3	Relação entre velocidade e fluxo de tráfego para segmentos de rodovias de múltiplas faixas	7
4	Configuração dos veículos em relação aos níveis de serviço definidos no HCM	16
5	LOS de acordo com as curvas de velocidade-fluxo de tráfego	17
6	Rodovias do SNV	18
7	Modelo de <i>ranking</i> horário de volume dos volumes horários de todas as horas do ano	20
8	BR-101 dentro dos limites de SC	27
9	Localização dos postos de contagem na BR-101/SC	30
10	Representação gráfica dos dados de contagem no endereço eletrônico do PNCT	31
11	Fluxograma do método	33
12	Filtros aplicados na seção de contagem contínua do PNCT	36
13	Identificação do código do posto de contagem no API	36
14	Tela inicial do HCM-CALC, com as opções utilizadas no estudo selecionadas	42
15	Dados de entrada do HCM-CALC para o cálculo do nível de serviço de rodovias de múltiplas faixas	42
16	Segmentos homogêneos abrangidos pelos postos de contagem do PNCT em SC	43
17	Segmentos homogêneos na área de estudo, identificados em vermelho	45
18	Pastas onde foram salvos os dados de volume	47
19	Comparação das curvas normalizadas para verificação de similaridade entre postos de referência e postos de curta duração	50
20	Largura de faixa no segmento 1 observada no <i>Google Earth Pro</i>	54
21	Tipo de divisão dos segmentos homogêneos	55
22	Pontos de acesso encontrados no segmento 1, do posto de contagem do do km 13, e exemplo de um ponto de acesso	57
23	Cálculo do LOS no HCM-CALC para o sentido crescente do segmento 1	58
24	Representação gráfica do nível de serviço (LOS) calculado para os segmentos da área de estudo	60

Lista de Tabelas

1	Valores de redução da FFS para largura de faixa	9
2	Redução da FFS conforme desobstrução lateral para rodovias de quatro faixas	10
3	Redução da FFS conforme tipo de divisão para rodovias de múltiplas faixas	10
4	Redução da FFS conforme a densidade de pontos de acesso para rodovias de múltiplas faixas	11
5	Valores de PCE para segmentos de terreno genéricos	13
6	Critério para definição de LOS conforme a densidade	17
7	Principais atributos contidos nos dados de atributos do SNV	19
8	Planilha eletrônica fornecida pelo estudo de VMDa do PNCT	29
9	Postos de contagem do PNCT na BR-101/SC	29
10	Formato em que os dados para <i>download</i> são disponibilizados no endereço eletrônico do PNCT	32
11	Dados relativos à identificação dos segmentos homogêneos	44
12	Códigos dos postos de contagem no código fonte e anos com dados disponíveis	46
13	Verificação de completude mensal para os posto de contagem de curta duração	47
14	Formato em que estão dispostos os dados obtidos no PNCT	48
15	Distâncias euclidianas calculadas para o relacionamento dos postos de referência e curta duração	49
16	Valores obtidos para o fator K e para o FHP nos postos de referência	51
17	Valores obtidos para o fator de expansão mensal f_m nos postos de referência, por sentido	52
18	Valores de VMDa e VHP calculados para os postos de curta duração	53
19	Valores de Pt calculados para os postos de contagem	53
20	Tipo de terreno e <i>BFSS</i> , em <i>mi/h</i> , para cada segmento	56
21	Valores utilizados no cálculo e densidade de pontos de acesso para os segmentos . . .	57
22	Dados de entrada inseridos no HCM-CALC	59
23	Resultados do HCM-CALC e LOS calculado por segmento, para cada sentido	61

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo geral	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	O <i>Highway Capacity Manual 6</i>	3
2.2	Modelo para análise operacional de rodovias de múltiplas faixas do HCM 6	4
2.2.1	Relação entre fluxo e velocidade	6
2.2.2	Estimação e ajuste da velocidade de fluxo livre	7
2.2.3	Estimativa da capacidade para rodovias	11
2.2.4	Ajuste do volume de demanda	11
2.2.5	Conceito de veículos pesados de acordo com o HCM 6	12
2.2.6	Estimativa de velocidade e densidade	14
2.2.7	Nível de serviço	14
2.3	O Sistema Nacional de Viação	17
2.4	Volume de tráfego	19
2.4.1	Volume horário de projeto e fator K	19
2.4.2	Volume médio diário	21
2.5	Plano Nacional de Contagem de Tráfego	22
2.6	Relacionamento entre postos de contagem	23
2.6.1	Determinação de relacionamento	24
2.7	Expansão volumétrica	25
3	Área de estudo	27
3.1	Postos de contagem do PNCT	29
4	Método	33
4.1	Materiais	34
4.2	Seleção dos segmentos homogêneos	35
4.3	Verificação de completude dos postos de contagem	35
4.4	Obtenção dos dados de volume	37
4.5	Verificação de relacionamento entre postos de referência e postos de curta duração	38
4.6	Cálculo do fator K e do FHP para os postos de referência	39

4.7	Expansão volumétrica nos postos de curta duração	40
4.8	Cálculo da proporção de veículos pesados	40
4.9	Levantamento das características geométricas da via	41
4.10	Cálculo do nível de serviço utilizando o <i>software</i> HCM-CALC	41
5	Resultados	43
5.1	Segmentos homogêneos	43
5.2	Completeness mensais e anuais dos dados dos postos do PNCT	46
5.3	Dados de volume	47
5.4	Verificação de relacionamento entre os postos de referência e de curta duração	48
5.4.1	Casos onde não foi possível estabelecer relacionamento	51
5.5	Resultado dos cálculos do fator K, FHP, expansão volumétrica e proporção de veículos pesados	51
5.6	Definição dos dados geométricos da via	53
5.6.1	Levantamento de dados	53
5.6.2	Determinação da velocidade de fluxo livre	56
5.7	Cálculo do nível de serviço	57
6	Conclusões	62
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	63
	Referências	64
A	<i>Script</i> para verificação de completude mensal e anual de um posto de contagem	66
B	<i>Script</i> para agregação dos dados de um ano de um posto de contagem em um único arquivo .csv	68

1 Introdução

A globalização, dominante no século XXI, trouxe a necessidade da evolução dos meios de transporte para garantir e melhorar a competitividade econômica e o bem estar dos seres humanos. Segundo Ortúzar e Willumsen (2001), países em desenvolvimento sofrem com problemas relacionados a transporte, similares àqueles prevalentes no mundo industrializado, como congestionamentos, por exemplo. Conforme colocam Garber e Hoel (2009), a ausência de serviços de transporte adequados é um limitante para o potencial econômico de uma região, portanto, expectativas de desenvolvimento e crescimento passam diretamente por um sistema de transporte forte.

De acordo com FIESC (2020), a evolução da frota de veículos dos municípios que têm seu tráfego influenciado pelo trecho catarinense da BR-101 foi de 52,9% entre 2010 e 2019. Além disso, a evolução da corrente de comércio *Free on Board* (FOB, livre a bordo) no mesmo período foi de US\$ 15,3 bi em 2010 para US\$ 20,9 bi em 2019. O crescimento da população e das atividades econômicas justificam a preocupação com a conservação, a segurança e a fluidez do trecho catarinense da rodovia.

Para projetos de engenharia de tráfego, é necessário conhecer as características das vias para verificar se estão aptas a cumprir com o nível de qualidade de serviço exigido pelas entidades que controlam a infraestrutura de transportes. De acordo com Garber e Hoel (2009), a análise da capacidade de uma rodovia envolve a avaliação quantitativa da potencialidade da seção da pista para receber tráfego, usando procedimentos para determinar o fluxo máximo que uma determinada seção de rodovia é capaz de suportar sob condições prevalentes de tráfego e controle.

É necessária, portanto, uma metodologia de avaliação do nível de serviço e da capacidade nas rodovias, de modo a fundamentar e identificar a necessidade de investimentos na malha rodoviária. Nesse contexto, o Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) foi implantado no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Segundo o DNIT¹, o programa teve início em 1975 com o "Programa de Contagem Sistemática de Trânsito", implantado nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. O PNCT é fundamental para a identificação do comportamento do tráfego nas rodovias federais, e os postos de contagem do PNCT garantem subsídios básicos para os estudos de planejamento econômico e rodoviário.

Os métodos mais utilizados no mundo para a análise da capacidade e do nível de serviço são trazidos pelo "*Highway Capacity Manual*". A sexta versão do HCM, o HCM 6, aborda um método para análise da capacidade de nível de serviço para rodovias de múltiplas faixas, que pode ser aplicado na BR-101 dentro do estado de Santa Catarina.

¹Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Inicio/institucional>>, acesso em 18/04/2023.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral é realizar uma análise operacional dos segmentos da BR-101 em SC, para os quais existem dados abertos disponíveis, por meio da aplicação da modelagem de rodovias de múltiplas faixas do HCM 6, para a determinação do seu nível de serviço utilizando os dados mais atuais possíveis.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- a) verificar a disponibilidade e a abrangência de dados abertos necessários para a aplicação da modelagem;
- b) obter os dados disponíveis utilizando *webscraping*;
- c) Utilizar o método descrito em Coelho e Rodrigues (2021)
- d) explorar recursos computacionais disponíveis para a aplicação do método do HCM.

2 Revisão bibliográfica

Esta seção apresenta os principais conceitos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, são apresentados conceitos fundamentais do HCM 6, necessários para o cálculo do nível de serviço. Posteriormente, são apresentados conceitos relacionados a vias, conceitos de volume na engenharia de tráfego e procedimentos de cálculo de expansão volumétrica.

2.1 O *Highway Capacity Manual 6*

Conforme coloca TRB (2016a), o *Highway Capacity Manual* foi documentado pela primeira vez em 1950, para quantificar o conceito de capacidade para instalações de transporte. O objetivo original era oferecer "um guia prático por meio do qual o engenheiro, na posse de determinados fatos essenciais, pudesse projetar uma rodovia ou revitalizar uma mais velha, com a garantia de que a capacidade resultante fosse igual à calculada".

O HCM evoluiu ao longo dos anos para se manter atualizado quanto às necessidades dos seus usuários e da sociedade, seguindo principalmente o crescimento da necessidade de planejamento e das operações ocorridas nos Estados Unidos.

Em sua segunda edição, de 1965, o HCM introduziu o conceito de "*Level of Service*" (LOS), nível de serviço, em tradução direta. Essa versão do HCM permitia o cálculo da capacidade, do volume de serviço e do nível de serviço a ser provido nas rodovias, fossem projetos novos ou rodovias preexistentes sob condições específicas, de acordo com TRB (2016a).

O manual seguiu evoluindo com as edições 3, 4 e 5, de 1985, 2000 e 2010, respectivamente. Em 2016, chegou em sua sexta edição, o HCM 6. O método definido no HCM 6 para o cálculo de nível de serviço em rodovias de múltiplas faixas também é aplicável em segmentos básicos de *freeway*. As informações e especificidades apresentadas neste capítulo acerca do método são relacionadas às rodovias de múltiplas faixas.

De acordo com Oliveira (2021), o HCM é o principal documento utilizado no mundo para estimar e avaliar a capacidade e o nível de serviço de elementos viários. Conforme é colocado em Brasil (2006), os valores obtidos por intermédio dos métodos do HCM são mais exatos que quaisquer outros valores estimados previamente à sua publicação. O HCM é desenvolvido pela *Transportation Research Board*, e é composto por 4 volumes:

- Volume 1: Conceitos;
- Volume 2: Trânsito ininterrupto;
- Volume 3: Trânsito interrompido;
- Volume 4: Guia de aplicações.

De acordo com TRB (2016a), os objetivos do HCM 6 são:

- definir métricas de performance e descrever métodos de serviço para características chave do tráfego;
- prover metodologias para estimar e prever métricas de performance;
- explicar as metodologias a um nível de detalhe que permita ao leitor entender os fatores que afetam a operação multimodal.

Condições básicas e prevalecentes Conforme coloca TRB (2016a), as condições básicas de uma rodovia têm como premissa boas condições meteorológicas, pavimento seco e de qualidade, usuários familiares com a rodovia e a ausência de impedimentos no fluxo de tráfego. No entanto, as condições prevalecentes de uma rodovia não são as mesmas definidas nas condições básicas. Isso ocorre pois, na prática, ocorrem acidentes, mudanças na infraestrutura da via (largura de faixa, desobstruções laterais, densidade de acesso, tipo de divisão...), mudanças de relevo (plano, ondulado ou montanhoso), chuvas fortes, entre outros fatores que tornam as condições prevalecentes mais restritivas que as condições básicas.

O HCM 6 modela o fluxo de tráfego com base nas condições básicas de tráfego, por isso, é necessário ajustar alguns parâmetros aplicados nos cálculos do método para definição do nível de serviço do segmento em questão para que fiquem adequados às condições prevalecentes. Isso é explicativo das condições para o estabelecimento da modelagem. Na realidade, o projetista não precisa conhecer a diferença entre essas condições para aplicar os métodos.

2.2 Modelo para análise operacional de rodovias de múltiplas faixas do HCM 6

O volume 2 do HCM 6 apresenta o modelo para análise operacional de rodovias de múltiplas faixas. Conforme coloca TRB (2016b), a metodologia é limitada para condições de tráfego não congestionadas, ou seja, a taxa entre demanda e capacidade para um segmento deve ser menor ou igual a 1,0. Condições não congestionadas também incluem a inexistência de impactos de enfileiramentos causados por congestionamentos a jusante.

Conforme coloca TRB (2016b), rodovias de múltiplas faixas possuem, geralmente, de quatro a seis faixas, considerando as duas direções. Essas rodovias podem ser não divididas, com uma linha central separando as direções de fluxo, divididas, com uma divisão física separando as direções de fluxo, ou podem possuir uma faixa de conversão à esquerda (*two way left turn lane, TWLTL*).

A Figura 1 mostra exemplos visuais de rodovias de múltiplas faixas.

Figura 1: Exemplos de rodovias de múltiplas faixas



Fonte: Adaptado de TRB (2016b)

Para uma análise operacional em rodovias de múltiplas faixas utilizando o método definido no HCM 6, devem ser especificados:

- número de faixas;
- volume de demanda;
- fator de hora de pico (FHP);
- velocidade de fluxo livre (*Free Flow Speed, FFS*);
- tipo de terreno;
- porcentagem de veículos pesados.

Caso a FFS não seja medida em campo, ela deve ser estimada. Para isso, é necessário, adicionalmente:

- largura das faixas;
- desobstruções laterais;

- densidade de pontos de acesso.

Caso os dados de demanda tenham sido obtidos em condições adversas de visibilidade, como neblina e chuvas fortes, podem ser determinados fatores de ajuste adicionais para a capacidade e para a FFS. Também é possível levar em consideração o efeito do percentual de motoristas não familiarizados com a rodovia.

Para rodovias de múltiplas faixas, o método fornecido pelo HCM 6 analisa o fluxo de tráfego sob condições ininterruptas. O fluxo ininterrupto tem como principal característica o fato de não possuir elementos fixos que causem atraso ou interrupção no fluxo de tráfego. Esse fluxo é caracterizado pela interação individual dos veículos com outros veículos na mesma via, bem como com suas características geométricas. O fluxo ininterrupto descreve o tipo de via, e não a qualidade do fluxo de tráfego em qualquer período de tempo.

Para análises operacionais na engenharia de tráfego em fluxo ininterrupto, os estudos são realizados a nível de segmento homogêneo, ou seja, segmentos da rodovia que possuam condições físicas de infraestrutura e demanda homogêneas ao longo de todo o segmento. Conforme coloca TRB (2016b), não podem existir, a nível de infraestrutura, alterações na superfície de rolamento, na largura de faixa, no tipo de acostamento e no relevo, assim como também não podem existir acessos que alterem as condições de demanda, referentes a volume, velocidade e classificação da via.

O tamanho do segmento homogêneo não é fixo, porém a aplicação do HCM 6 define, de acordo com TRB (2016a), que deve haver pelo menos duas milhas ($\approx 3,2\text{km}$) entre pontos de interrupção de tráfego. Dentro dessas duas milhas, pode haver mais de um segmento.

2.2.1 Relação entre fluxo e velocidade

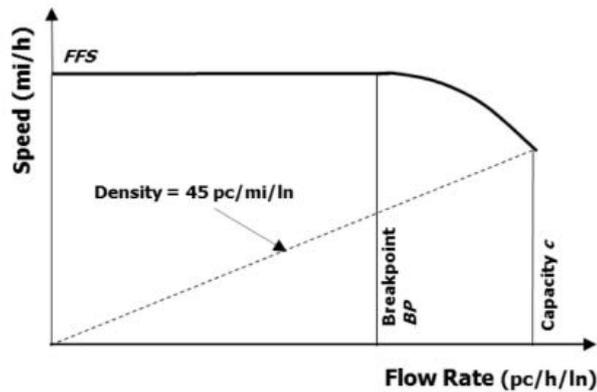
De acordo com TRB (2016b), a FFS é a velocidade média na qual os veículos trafegam em um determinado segmento, sob condições de baixo volume e quando não existem impedimentos causados pela presença de outros veículos.

Sob condições básicas, as curvas de relação entre fluxo e velocidade para a modelagem de rodovias de múltiplas faixas seguem as características listadas a seguir.

- Faixa de velocidade constante: existe uma faixa de fluxos de tráfego, medida em $pc/h/ln$, (carros de passageiro/hora/faixa) na qual a velocidade é constante. Essa faixa se estende de uma taxa de tráfego de zero até um valor de *breakpoint* BP, que para rodovias de múltiplas faixas, é de $1400 pc/h/ln$. Acima dessa faixa, a velocidade é igual à FFS.
- Do BP até a capacidade c , a velocidade diminui a partir da FFS.
- A capacidade é atingida quando a densidade de fluxo de tráfego D é de $45 pc/mi/ln$.

A modelagem macroscópica dessa relação é mostrada na Figura 2. O eixo x representa a demanda de fluxo de tráfego de 15 minutos ajustada, e o eixo y representa a velocidade média espacial do fluxo de tráfego.

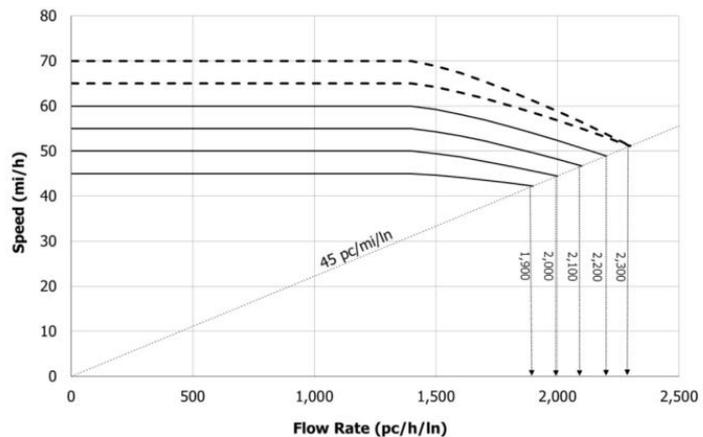
Figura 2: Modelagem macroscópica da relação entre velocidade e fluxo de tráfego



Fonte:TRB (2016b)

Para rodovias de múltiplas faixas, a relação entre velocidade e taxa de fluxo de tráfego pode ser observada na Figura 3.

Figura 3: Relação entre velocidade e fluxo de tráfego para segmentos de rodovias de múltiplas faixas



Fonte:TRB (2016b)

2.2.2 Estimação e ajuste da velocidade de fluxo livre

Medição em campo A FFS é a velocidade média de carros de passageiros medida durante períodos de fluxo baixo a moderado (até 500 pc/h/ln). Para segmento de rodovia de múltiplas

faixas, as velocidades médias são virtualmente constantes nesta faixa de taxas de fluxo. A medição de campo de FFS, se possível, é preferível. Se a FFS for medida diretamente, nenhum ajuste será aplicado ao valor medido.

Algumas rodovias podem ter limites de velocidade mais baixos para caminhões, o que pode afetar a FFS de fluxo misto. Nestes casos, estudos de campo são recomendados, uma vez que a metodologia de estimativa da FFS a seguir não é sensível ao limite de velocidade regulamentar, ou à presença de uma alta porcentagem de caminhões.

O estudo da velocidade deve ser conduzido em um local que seja representativo do segmento em um momento em que as taxas de fluxo sejam inferiores a 1000 $pc/h/ln$. O estudo de velocidade deve medir as velocidades de todos os carros de passageiros ou usar uma amostra sistemática (por exemplo, a cada 10 carros em cada faixa). É necessário obter uma amostra de pelo menos 100 velocidades de automóveis de passageiros. Qualquer técnica de medição de velocidade que tenha sido considerada aceitável para outros tipos de aplicações de engenharia de tráfego pode ser usada.

FFS estimada Conforme TRB (2016b), as características da via, como largura de faixa, desobstrução lateral, o tipo de divisão e a densidade de pontos de acesso afetam a FFS.

Para segmentos de rodovia de múltiplas faixas, conforme TRB (2016b), a FFS pode ser estimada conforme a Equação 1, baseada nas características físicas do segmento estudado.

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{TLC} - f_M - f_A \quad (1)$$

onde:

$BFFS$ = velocidade de fluxo livre básica para o segmento de múltiplas faixas (mi/h);

f_{LW} = ajuste para largura de faixa (mi/h);

f_{TLC} = ajuste para desobstrução lateral (mi/h);

f_M = ajuste para o tipo de divisão (mi/h);

f_A = ajuste para a densidade de pontos de acesso (mi/h).

A BFFS, para a modelagem de rodovias de múltiplas faixas, é o limite de velocidade regulamentar ou legal mais 5 mi/h para limites de velocidade de 50 mi/h ou maiores e como o limite de velocidade mais 7 mi/h para limites de velocidade inferiores a 50 mi/h .

Os ajustes aplicados para a estimação da FFS são definidos a seguir.

- Ajuste para largura de faixa

A condição básica para a largura da pista é de 12 pés ou maior. Caso a largura média da faixa em todas as faixas seja inferior a 12 pés, a FFS é afetada negativamente e os ajustes são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de redução da FFS para largura de faixa

Largura média da faixa (<i>ft</i>)	Redução na FFS (<i>mi/h</i>)
≤ 12	0,0
≤ 11 - 12	1,9
≤ 10-11	6,6

Fonte: TRB (2016b)

- Ajuste para a desobstrução lateral total

O ajuste para a desobstrução lateral total (TLC) é baseado no TLC da beira da estrada (lado direito) e na mediana (lado esquerdo). A desobstrução lateral direita é medida da borda direita das faixas de rodagem até a obstrução lateral periódica ou contínua mais próxima à beira da estrada. Se essas obstruções estiverem a mais de 6 pés da borda do pavimento, o valor de 6 pés é utilizado.

Quanto à desobstrução lateral esquerda, barreiras comuns, como de concreto e defensas metálicas, não afetam o comportamento do motorista se não estiverem a menos de 2 pés da borda da faixa de rodagem. Caso o segmento de rodovia não seja dividido ou possua um TWLTL, nenhuma restrição lateral esquerda é assumida e um valor de 6 pés é aplicado.

A desobstrução lateral total é descrita conforme a Equação 2.

$$TLC = LC_R + LC_L \quad (2)$$

onde:

LC_R = desobstrução lateral à direita em pés (max.6 ft);

LC_L = desobstrução lateral à esquerda em pés (max.6 ft).

A Tabela 2 mostra a redução aplicada à FFS conforme a desobstrução lateral total TLC.

Tabela 2: Redução da FFS conforme desobstrução lateral para rodovias de quatro faixas

TLC (ft)	Redução na FFS f_{TLC} (mi/h)
12	0,0
10	0,4
8	0,9
6	1,3
4	1,8
2	3,6
0	5,4

Fonte: TRB (2016b)

- Ajuste para o tipo de divisão

A Tabela 3 apresenta o fator de ajuste para a divisão encontrada nos segmentos de rodovias de múltiplas faixas.

Tabela 3: Redução da FFS conforme tipo de divisão para rodovias de múltiplas faixas

Tipo de divisão	Redução na FFS f_M (mi/h)
Não dividida	1,6
TWLTL	0,0
Dividida	0,0

Fonte: TRB (2016b)

- Ajuste para a densidade de pontos de acesso

Conforme TRB (2016b), para cada ponto de acesso por milha, a FFS estimada diminui em aproximadamente $0,25\ mi/h$, independente do tipo de divisão central.

O número de pontos de acesso por milha é determinado pela divisão do número de pontos de acesso total no lado direito da rodovia, na direção de viagem do fluxo, pelo comprimento do segmento, em milhas.

A Tabela 4 apresenta o fator de ajuste para a densidade de pontos de acesso em um segmento de múltiplas faixas.

Tabela 4: Redução da FFS conforme a densidade de pontos de acesso para rodovias de múltiplas faixas

Densidade de pontos de acesso (<i>pontos de acesso/mi</i>)	Redução na FFS f_A (<i>mi/h</i>)
0	0,0
10	2,5
20	5,0
30	7,5
≤ 40	10,0

Fonte: TRB (2016b)

2.2.3 Estimativa da capacidade para rodovias

Conforme coloca TRB (2016b), a capacidade de um segmento é principalmente uma função da FFS, podendo ser calibrada e ajustada para as condições locais, incluindo o impacto de fatores adversos como condições meteorológicas, acidentes e outros fatores. A capacidade básica de um segmento de múltiplas faixas pode ser estimada com a Equação 3:

$$c_{MF} = 1900 + 20 \cdot (FFS_{adj} - 45) \quad (3)$$

onde:

c_{MF} : capacidade básica do segmento de múltiplas faixas;

FFS_{adj} : FFS após a aplicação dos fatores de ajuste.

A capacidade encontrada nessa Equação não pode exceder o valor de 2300 *pc/h/ln*. O valor de FFS utilizado na equação também não pode ser superior a 70 *mi/h*. A FFS também não pode ser inferior a 50 *mi/h*.

2.2.4 Ajuste do volume de demanda

Conforme TRB (2016b), uma vez que as curvas de velocidade e os parâmetros mostrados na Figura 2 estão em valores de *Passenger Car Equivalency* (carros de passageiro equivalentes, PCE), o volume de demanda expresso em veículos por hora sob condições prevalecentes deve ser convertido para essa base de acordo com a Equação 4.

$$v_p = \frac{V}{FHP \cdot N \cdot f_{HV}} \quad (4)$$

onde:

v_p = taxa de fluxo de demanda sob condições básicas equivalentes (*pc/h/ln*);

V = volume de demanda sob condições prevalecentes (*veh/h*, veículos/hora);

FHP = fator hora de pico (decimal);

N = número de faixas na direção de análise (ln);

f_{HV} = fator de ajuste para a presença de veículos pesados (decimal).

Observações no fluxo de tráfego indicam que as taxas de fluxo encontradas no pico de 15 minutos dentro de uma hora não são sustentadas durante toda a extensão dessa hora. Em rodovias de múltiplas faixas, valores típicos de FHP ficam entre 0,75 e 0,95. Valores menores indicam condições de baixo volume.

Em TRB (2016a), é definido que os procedimentos do HCM 6 são tipicamente expressos em termos de demanda horária, por isso, o HCM usa o fator hora de pico (FHP) para converter um volume horário em um fluxo de tráfego de pico de 15 minutos. O FHP para períodos de 15 minutos pode ser definido de acordo com a Equação 5.

$$FHP = \frac{V}{4 \cdot V_{15}} \quad (5)$$

onde:

FHP = fator hora de pico;

V = volume horário (veh/h);

V_{15} = volume durante os 15 minutos de pico da hora de análise ($veh/15min$).

2.2.5 Conceito de veículos pesados de acordo com o HCM 6

A performance de veículos pesados é limitada quando comparada a veículos de passeio, principalmente devido às suas características de aceleração e frenagem, afetados pelo seu peso e seu comprimento. Em TRB (2016b), são definidas duas categorias de veículos pesados: caminhões não articulados (*single-unit trucks, SUTs*) e articulados (*tractor-trailers, TT*). Ônibus e veículos recreacionais são tratados como SUTs.

A metodologia do HCM 6 considera os efeitos de veículos pesados no nível de serviço com o valor de *passenger car equivalency* (PCE), ou seja, utiliza fatores típicos de fluxo de automóveis de passageiro ao converter um fluxo de carros e caminhões em um único fluxo de PCE uniforme. As tabelas de PCE do HCM 6 foram geradas a partir de um modelo de fluxo misto, que avalia de maneira direta a capacidade, a velocidade e a densidade dos fluxos de tráfego. Os valores de PCE são baseados na equivalência entre a taxa de fluxo misto na capacidade ($veh/h/ln$, veículos por hora por faixa) e a taxa de fluxo do tráfego equivalente de automóveis ($pc/h/ln$, carros de passageiro por hora por faixa).

De acordo com TRB (2016b), o ajuste desse fator ocorre em duas etapas: primeiro, o valor de PCE para cada caminhão é definido para as condições prevaletentes de estudo. Essa

equivalência define o valor que representa o número de carros de passageiros que usaria a mesma capacidade utilizada por um caminhão em condições prevalentes. Depois, a Equação 6 é utilizada para converter os valores de PCE para o fator de ajustamento.

O efeito dos veículos pesados no fluxo de tráfego depende das condições do greide e da composição de tráfego, podendo ser selecionados para uma das duas condições:

- segmentos de rodovias de múltiplas faixas em terrenos genéricos;
- subidas ou descidas específicas, onde os segmentos de rodovias de múltiplas faixas maiores que 0,5 milhas possuam de 2 a 3% de greide ou segmentos com mais de 0,25 milhas possuam greides maiores que 3%.

Em TRB (2016b) é definido que as equivalências para terrenos genéricos se referem a comprimentos estendidos de rodovias de múltiplas faixas contendo uma série de subidas e descidas onde nenhuma inclinação é longa ou íngreme o suficiente para ter um impacto significativo na operação de todo o segmento. Os terrenos genéricos podem ser classificados como planos ou ondulados.

Cada subida e descida deve ser considerada como um único greide, ainda que a inclinação não seja uniforme. O comprimento total da subida ou da descida é usado com a inclinação mais íngreme que ela contém. Os segmentos planos e ondulados são caracterizados da seguinte maneira:

- terreno plano: qualquer combinação de greides e alinhamentos horizontais ou verticais que permitam que veículos pesados mantenham a mesma velocidade que carros de passageiro. Esse tipo de terreno, tipicamente, contém inclinações curtas não maiores que 2%;
- terreno ondulado: qualquer combinação de inclinações e alinhamento horizontal ou vertical que faz com que os veículos pesados reduzam sua velocidade abaixo da dos carros de passageiros, mas que não faz com que os veículos pesados operem em velocidades de rastejamento em qualquer comprimento significativo.

A Tabela 5 fornece o PCE para o *mix* padrão de caminhões em condições de terreno genérico.

Tabela 5: Valores de PCE para segmentos de terreno genéricos

PCE	Terreno plano	Terreno ondulado
E_T	2,0	3,0

Fonte:TRB (2016b)

Para subidas e descidas específicas, a determinação do PCE é mais complexa. Envolve a determinação da quantidade relativa de SUTs e TTs na porcentagem de veículos pesados, apresentando seus valores tabelados apenas para determinadas porcentagens, sendo necessário aplicar a modelagem de fluxo misto para a sua determinação.

O fator de ajuste para veículos pesados f_{HV} é computado a partir da combinação das duas classes de veículos pesados, que são agregadas para um valor geral de porcentagem de caminhões P_T . O valor do f_{HV} é calculado conforme a Equação 6.

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

onde:

f_{HV} = fator de ajuste para veículos pesados (decimal);

P_T = proporção de SUTs e TTs no tráfego (decimal);

E_T = PCE para um veículo pesado no fluxo de tráfego.

2.2.6 Estimativa de velocidade e densidade

A Equação 7 é a relação macroscópica fundamental do fluxo do tráfego e é utilizada para a determinação da densidade na modelagem de rodovias de múltiplas faixas.

$$D = \frac{v_p}{S} \quad (7)$$

onde:

D = densidade ($pc/mi/ln$);

v_p = demanda da taxa de fluxo de tráfego ($pc/h/ln$);

S = velocidade operacional média do fluxo de tráfego.

2.2.7 Nível de serviço

De acordo com o TRB (2016a), o nível de serviço (do termo "*Level of Service*", LOS), é uma estratificação quantitativa de métricas de performance que representam a qualidade do serviço de uma via. O HCM 6 define seis níveis de serviço, de A até F, sendo que o nível A representa a melhor condição operacional da perspectiva do usuário da via, e o nível F, o pior.

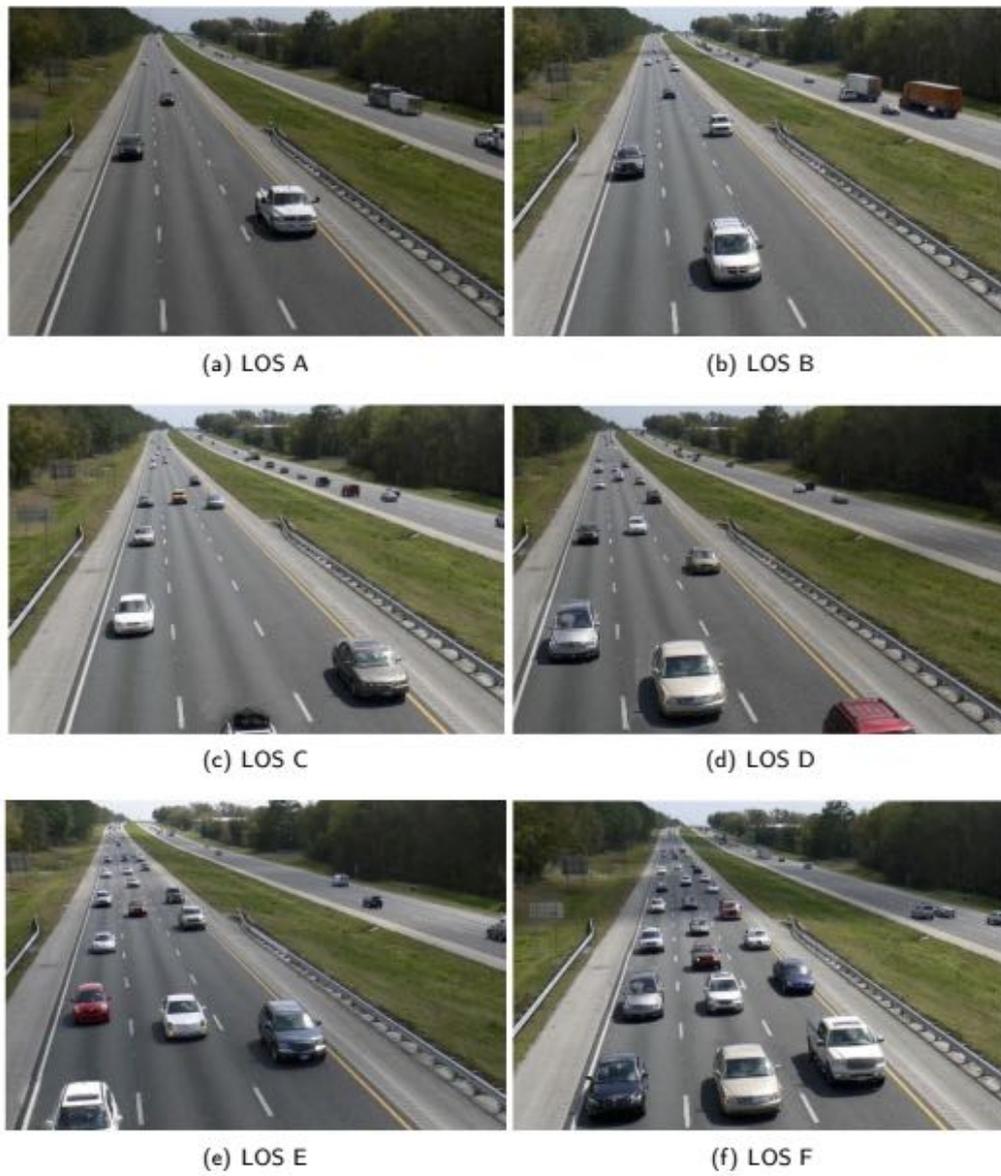
Para segmentos de múltiplas faixas, o TRB (2016a) define que a medida de serviço é dada pela densidade. A liberdade para manobrar e a proximidade com outros veículos são essenciais para a qualidade do serviço, e essas qualidades são relacionadas à densidade, que aumenta conforme o fluxo de tráfego se aproxima da sua capacidade, fator não observado na variação da velocidade, o

que faz com que aumentos de densidade sejam mais perceptíveis pelos motoristas. A descrição de cada nível de serviço, para rodovias de múltiplas faixas é definida a seguir.

- Nível de serviço A: descreve operações de fluxo livre, onde a FFS é prevaiente e os veículos são quase totalmente desimpedidos em sua capacidade de manobrar dentro do fluxo de tráfego. Os efeitos de incidentes ou falhas são facilmente absorvidos.
- Nível de serviço B: representa operação de fluxo razoavelmente livre. A FFS é mantida e a capacidade de manobra dentro do fluxo de tráfego é ligeiramente restrita. O nível de conforto físico e psicológico do motorista é alto, e os efeitos de pequenos incidentes ainda são facilmente absorvidos.
- Nível de serviço C: fornece fluxo com velocidades próximas à FFS, no entanto a liberdade para manobrar dentro do fluxo de tráfego é restrita, e mudanças de faixa exigem mais atenção e vigilância por parte do motorista quando comparadas a níveis mais altos de serviço. Incidentes menores ainda podem ser absorvidos, ainda que seja observada deterioração na qualidade do serviço local. Há possibilidade de formação de fila por trás de bloqueios.
- Nível de serviço D: as velocidades diminuem com o aumento do fluxo, e a densidade aumenta de maneira mais rápida. A liberdade de manobra dentro do fluxo de tráfego é seriamente limitada e os motoristas experienciam níveis reduzidos de conforto físico e psicológico. Pequenos incidentes formam filas, devido ao pouco espaço no fluxo de tráfego para absorver interrupções.
- Nível de serviço E: a operação já está próxima da capacidade ou está operando no seu limite. Não existem lacunas utilizáveis dentro do fluxo de tráfego, diminuindo o espaço para manobras. Qualquer interrupção no fluxo de tráfego pode estabelecer uma onda de interrupção propagada por todo o fluxo de tráfego a montante. Em direção ao limite superior de LOS E, o fluxo de tráfego não tem capacidade de dissipar qualquer interrupção, e qualquer tipo de incidente tem capacidade de produzir avaria séria e uma fila substancial. O conforto psicológico e físico experienciado pelos motoristas é ruim.
- Nível de serviço F: o fluxo é instável. Essas condições são encontradas em filas que se formam atrás de gargalos, e podem ser causadas por incidentes e pontos de congestionamento.

A Figura 4 mostra um exemplo de como ficam configurados os veículos para os diferentes níveis de LOS.

Figura 4: Configuração dos veículos em relação aos níveis de serviço definidos no HCM



Fonte: TRB (2016b)

A Tabela 6 apresenta a definição do LOS de acordo com a densidade, medida em carros de passeio por milha por faixa ($pc/mi/ln$). O valor limite para o LOS E, $45 pc/mi/ln$, é a máxima densidade em que fluxos sustentáveis na capacidade podem ocorrer, e a relação velocidade/capacidade (v/c) é igual a 1,00.

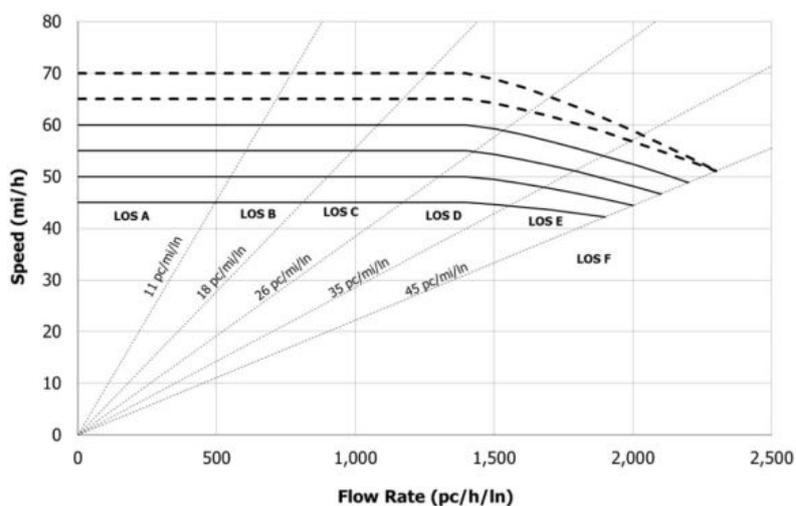
Tabela 6: Critério para definição de LOS conforme a densidade

LOS	Densidade ($pc/mi/ln$)
A	≤ 11
B	$> 11 - 18$
C	$> 18 - 26$
D	$> 26 - 35$
E	$> 35 - 45$
F	A demanda excede a capacidade ou densidade > 45

Fonte: TRB (2016b)

A Figura 5 mostra a faixa de densidade para cada nível de LOS para rodovias de múltiplas faixas. As linhas pontilhadas para 65 e 70 mi/h foram extrapoladas de outros resultados que não foram calibrados a partir de dados de campo.

Figura 5: LOS de acordo com as curvas de velocidade-fluxo de tráfego



Fonte:TRB (2016b)

2.3 O Sistema Nacional de Viação

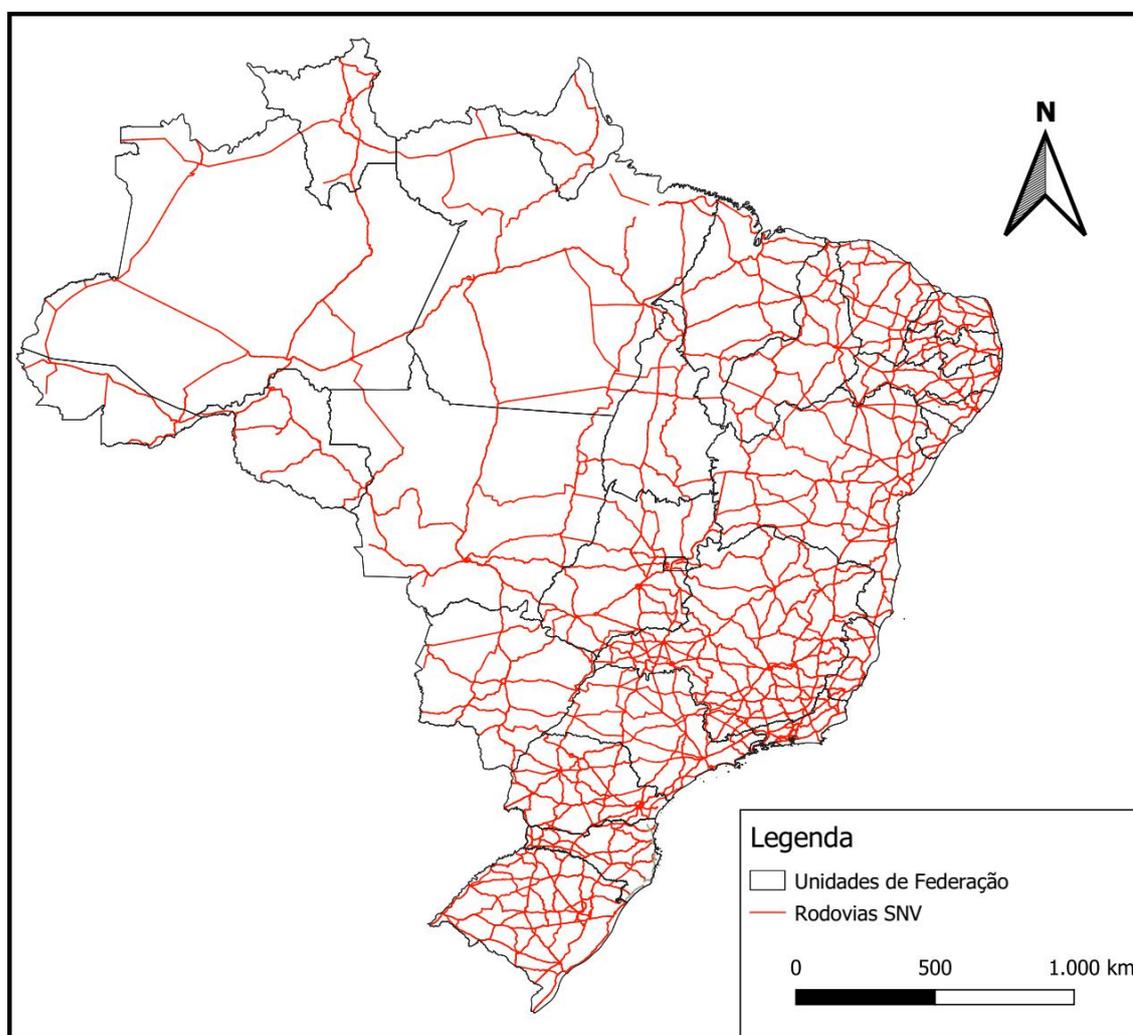
Conforme o DNIT (2023), o Sistema Nacional de Viação (SNV) é definido em Brasil (2011), constituído pela infraestrutura física e operacional dos modos de transporte de pessoas e bens, sob

jurisdição dos entes da federação. O SNV é disponibilizado pelo DNIT e distribuído gratuitamente de forma *online*, fornecendo uma base de dados descritiva acerca dos trechos rodoviários do Brasil.

De acordo com Paula (2018), a composição do SNV é resultante da integração dos subsistemas federais (SFVs), estaduais e distrital (SEVs) e municipais (SMVs) de viação, bem como dos modos rodoviário, ferroviário, aquaviário e aeroviário. Os resultados do SNV dependem da integração modal dos três subsistemas.

O DNIT fornece uma base de dados pública que descreve os trechos rodoviários. As informações são distribuídas por meio de arquivos *shapefile* (.shp), KML e planilhas eletrônicas. A Figura 6 mostra as rodovias do SNV² na versão intitulada "202301B". Os principais atributos da planilha do SNV estão apresentados na Tabela 7.

Figura 6: Rodovias do SNV



Fonte: Elaboração própria com dados de DNIT (2023) e IBGE (2023)

²Disponível em <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>>, acesso em 03/05/2023.

Tabela 7: Principais atributos contidos nos dados de atributos do SNV

Atributo	Descrição
id_trecho_	Número que identifica o segmento dentro do sistema do SNV
vl_br	Código da rodovia, cuja administração cabe ao Poder Executivo do país
sg_uf	Unidade da Federação onde o segmento rodoviário está localizado
vl_codigo	Código de identificação o segmento
ds_local_i	Campo indicativo do local de início do segmento rodoviário federal
ds_local_f	Campo indicativo do local de fim do segmento rodoviário federal
vl_km_inic	Quilômetro da rodovia onde se inicia o segmento
vl_km_fina	Quilômetro da rodovia onde se finda o segmento
vl_extensa	Extensão do segmento, em quilômetros

Fonte: DNIT (2023)

2.4 Volume de tráfego

Segundo Gomes (2004), o volume de tráfego é definido como o número de veículos que passa por uma seção de via em um determinado intervalo de tempo. Para estudos rodoviários, os volumes mais utilizados são o volume médio diário anual (VMDa) e o volume médio diário diário (VMDd). As análises de nível de serviço são sempre realizadas com volume horário.

De acordo com o TRB (2016a), o volume está relacionado com a demanda, no sentido que a demanda é relacionada com o número de veículos que devem ser servidos pelo elemento rodoviário, ao passo que o volume é o número de veículos que realmente é servido pelo elemento. O volume de tráfego contado em determinada localização ou em determinado dia não é igual ao volume de tráfego contado em outro dia. A demanda de tráfego varia sazonalmente, por dia da semana e por hora do dia. Isso ocorre pois os propósitos das viagens e o número de pessoas desejando viajar varia conforme o tempo.

Ainda segundo o TRB (2016a), é necessário levar em conta essas variações para garantir que a hora de pico do volume de demanda utilizada em uma análise do HCM reflita as condições de horas de pico do ano. Não considerar essas variações faz com que os resultados de um projeto reflitam as horas de pico de certos cenários temporais estudados, mas não reflitam as condições de pico encontradas durante o curso de um ano.

2.4.1 Volume horário de projeto e fator K

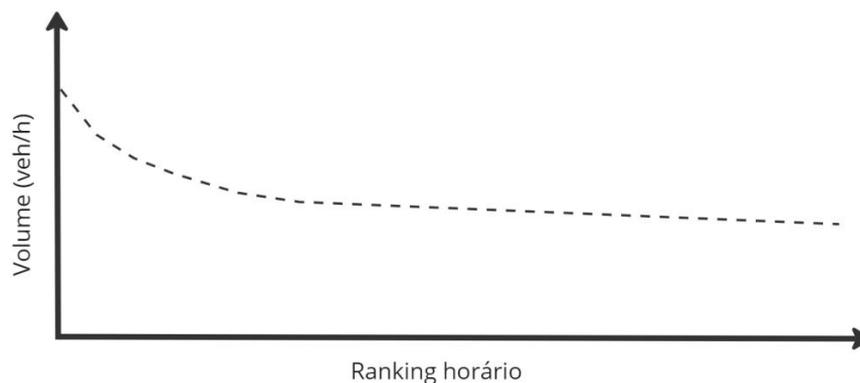
De acordo com Andrade (2016), o conceito de volume horário de projeto é utilizado na determinação do volume horário para análise operacional, pois as análises operacionais usualmente seguem o mesmo critério para a determinação do volume utilizado na fase de projeto da rodovia.

Rodovias construídas para os volumes mais elevados do ano não se justificam economicamente, uma vez que atenderiam um volume ocorrido em poucas horas do ano. Por esse motivo, as rodovias são projetadas para um volume menor que o volume máximo horário. De acordo com Gomes (2004), as rodovias devem permitir um número de horas de congestionamento.

Em Brasil (2006), é definido que para analisar as variações do fluxo de tráfego durante o dia, é adotada a hora para a unidade de tempo, chegando-se ao conceito de volume horário (VH), que é o volume total de veículos trafegando por uma seção em uma hora.

Conforme coloca Andrade (2016), ao se ordenar decrescentemente os volumes horários de todas as horas de um ano, em uma série de tráfego de uma rodovia, existe um padrão na curva formada. A curva apresenta uma redução no gradiente a partir das horas mais carregadas do ano, ficando estável com a diminuição dos volumes horários. Esse comportamento ocorre pois os maiores volumes do ano ocorrem em momentos atípicos, tais como fins de semana, férias e feriados. Um modelo que representa esse comportamento pode ser observado na Figura 7.

Figura 7: Modelo de *ranking* horário de volume dos volumes horários de todas as horas do ano



Fonte: Adaptado de Andrade (2016)

Conforme é colocado em Brasil (2006), a curva sofre uma mudança de declividade por volta da 30ª hora, sendo indicado que o volume deste horário possa ser escolhido como VHP. Os projetos no Brasil, no entanto, são mais tolerantes na escolha do VHP, considerando o volume da 50ª hora, favorecendo a economia em detrimento do nível de serviço.

O VHP adotado pode ser o da enésima hora de uma curva do tipo de volume horário de projeto. O VHP obtido por meio dessas curvas, no entanto, pode ser utilizado diretamente somente em postos com contagem anual ininterrupta. Para postos com contagem de curta duração, a determinação de volume da hora de análise seguindo o critério da enésima hora envolve a determinação do seu VMDa por expansão volumétrica e posterior aplicação do fator K . De acordo com ITE (2016), o fator K é calculado em um posto de referência de acordo com a Equação 8.

$$K = \frac{VHP}{VMDa} \quad (8)$$

onde:

VHP = volume horário de projeto (sendo o volume da n ésima hora, e também assumido como o valor do volume da "hora de pico", como utilizado no HCM);

$VMDa$ = volume médio diário anual.

A utilização do fator K determinado em um posto com contagem anual completa em um posto com contagem de curta duração depende do relacionamento estabelecido entre os postos, assunto abordado na Seção 2.6.

2.4.2 Volume médio diário

Em Brasil (2006), consta que o volume médio diário (VMD) é o volume médio de veículos que percorre um segmento de via em 24 horas. Ele é computado para um período de tempo representativo de um ano. Esse volume é usado para indicar a necessidade de novas vias ou melhorias na infraestrutura existente. O VMD não pode ser medido em todos os segmentos de uma rede com dados de demanda de campo, por isso, deve ser calculado com o fator K para segmentos onde não é feita contagem volumétrica.

São utilizados em estudos os conceitos de volume médio a seguir.

- Volume médio diário anual (VMDa): número total de veículos trafegando em um ano, dividido por 365.
- Volume médio diário mensal (VMDm): número total de veículos trafegando em um mês, dividido pelo número de dias do mês. Sempre deve vir acompanhado pelo mês ao qual se refere.
- Volume médio diário semanal (VMDs): número total de veículos trafegando em uma semana, dividido por 7. É sempre acompanhado pelo nome do mês a que se refere. É utilizado como uma amostra do VMDm.
- Volume médio diário em um dia de semana (VMDd): número total de veículos trafegando em um dia de semana. Deve ser sempre acompanhado pela indicação do dia da semana e do mês correspondente.

De acordo com Gomes (2004), os volumes mais frequentemente usados para estudos de planejamento de rodovias são o VMDa e o VMD. Isso ocorre pois o sistema viário existe para atender as atividades socioeconômicas, e diferentes atividades socioeconômicas ocorrem em diferentes épocas do ano. As entidades responsáveis pelo gerenciamento das malhas viárias normalmente têm como

objetivo a manutenção da sua malha como um todo, e o único valor de VMD que traz consigo uma média de toda a demanda envolvendo todas as atividades socioeconômicas é o VMDa.

2.5 Plano Nacional de Contagem de Tráfego

De acordo com Roess, Prassas e McShane (2004), as contagens de tráfego são a medida primária da demanda. Todos os aspectos da engenharia de tráfego requerem os volumes de demanda como dado de entrada. Em Brasil (2006), consta que as contagens volumétricas e classificatórias de veículos visam determinar a quantidade, o sentido e a composição do fluxo de tráfego, que passa por um ou vários pontos selecionados no sistema viário em uma determinada unidade de tempo.

O Plano Nacional de Contagem de Tráfego, de responsabilidade do DNIT, levanta dados de volume em pontos da malha rodoviária federal, disponibilizando os dados de contagem e outros estudos relacionados à contagem de veículos para o público. As informações acerca do PNCT são encontradas em seu endereço eletrônico³.

Conforme o endereço eletrônico do PNCT, após o "Programa de Contagem Sistemática de Trânsito", o programa evoluiu em 1976 para o "Plano Piloto de Contagem de Sistemática de Trânsito", que obteve sucesso. O DNIT então expandiu o programa de contagens. Em 1977, teve início o Plano Nacional de Contagem de Trânsito, com 120 postos permanentes. Em 1989, o PNCT tinha 235 postos permanentes, evoluindo para 285 postos até 1998.

Entre 1999 e 2001, os postos de monitoramento de tráfego da rede rodoviária federal sob jurisdição do DNIT já coletavam dados relativos ao volume de tráfego, às velocidades operacionais dos veículos e às cargas por eixo para os veículos de carga e de transporte coletivo. Esses dados, associados às características físicas dos trechos rodoviários, fornecem informações necessárias para melhor conhecimento dos aspectos operacionais de tráfego.

Em 2001, o PNCT foi interrompido por contingenciamentos orçamentários e, em 2013, foi retomado a partir da contratação de serviços de contagem de tráfego em postos específicos de rodovias federais com a cooperação do Exército Nacional.

Com a retomada do PNCT, o DNIT buscou cobrir um maior número de informações sobre a malha rodoviária federal brasileira, com contratos vigentes para a contagem de tráfego permanente em postos específicos. Essas contagens de tráfego são baseadas na instalação de equipamentos de contagem de tráfego em que o volume de veículos que passa em determinado ponto da rodovia é contabilizado e classificado.

As principais finalidades do programa são:

- planejar o sistema rodoviário;
- programar necessidades e prioridades de melhorias no sistema rodoviário atual;

³Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Inicio/institucional>>, acesso em 02/05/2023.

- medir a demanda atual de serviços por via rodoviária;
- estabelecer as tendências de tráfego no futuro;
- determinar os volumes de viagens de forma a proporcionar justificativa econômica aos investimentos programados;
- avaliar o fluxo existente de tráfego em relação ao sistema rodoviário atual;
- estimar os benefícios dos usuários nas rodovias;
- estabelecer uma classificação do sistema rodoviário;
- justificar e planejar o policiamento;
- estabelecer o veículo de projeto para fins de projeto geométrico;
- projetar o pavimento, obras de arte, seção transversal e outros elementos de rodovia;
- estudos de localização de postos de pesagem, socorro médico emergencial e etc...;
- analisar a capacidade de estabelecer o LOS;
- realizar análise estatística de acidentes;
- localizar e projetar instalações para a operação rodoviária.

2.6 Relacionamento entre postos de contagem

A aquisição de dados de tráfego em campo é onerosa. Hoje em dia, é economicamente inviável realizar dados de contagem para todos os segmentos homogêneos de uma análise operacional. De acordo com Coelho e Rodrigues (2021), para atender o aspecto econômico do projeto, são realizadas observações parciais de alguns postos, que podem ser expandidas pelo relacionamento com outros postos, de referência. Para tanto, deve ser estabelecida uma relação entre postos de contagem ininterrupta e de curta duração que possuem um mesmo comportamento geral de tráfego.

Conforme coloca Pignataro (1973):

"O uso de fatores de expansão e ajuste das estações de controle para ajustar as contagens de cobertura (curta duração) baseia-se na premissa de que padrões de tráfego semelhantes existem para instalações semelhantes em uma determinada área. Portanto, é necessário apenas identificar a estação de controle com um padrão de tráfego semelhante ao da estação de cobertura para obter os fatores de ajuste apropriados. O volume total de 24 horas em diferentes locais em uma área pode variar consideravelmente no valor total, mas a porcentagem do volume total registrado para qualquer hora específica do dia provavelmente será semelhante em todas as estações da área. Embora os volumes de tráfego variem

de um mês para outro, o relacionamento de cada volume mensal com o volume anual permanece bastante consistente ao longo de um período de anos."

Pignataro (1973) menciona ainda duas curvas de variação volumétrica que devem ser semelhantes para que dois postos possam ser relacionados: a de volumes horários ao longo do dia e a de volumes mensais ao longo do ano. A comparação deve ser feita de maneira normalizada, ou seja, o volume total de cada posto deve ser transformado em valores percentuais. Coelho e Rodrigues (2021) colocam que existe, além destas duas curvas, a curva de variação dos volumes diários ao longo da semana.

Ainda segundo Coelho e Rodrigues (2021), a análise de similaridade entre curvas de variação volumétrica envolveria as três curvas em situações ideais. Na prática, isso dificilmente acontece, pois em alguns postos não são realizadas contagens contínuas suficientes para a construção de todas as curvas. A análise de similaridade, portanto, pode não abranger as três curvas, mas somente as que puderem ser construídas. Para postos em que a contagem foi completa para um mês, é possível construir somente uma curva de variação do volume médio diário ao longo dos dias da semana, e curvas de variação dos volumes horários médios para cada dia da semana.

A determinação de forma analítica dos conjuntos de postos que possuem curva de variação volumétrica similares dentro de uma área de estudo é abordada na literatura técnica como a análise de *clusters*, conforme colocam Weijermans e Berkum (2005), Gecchele (2011) e Yang (2017).

2.6.1 Determinação de relacionamento

De acordo com Coelho e Rodrigues (2021), o propósito de estabelecer relações entre postos de referência e de curta duração é tornar possível a inclusão das variáveis de demanda de tráfego dos postos de curta duração no cálculo do nível de serviço do HCM. A relação entre os postos torna possível que o fator K do conjunto de dados de referência seja utilizado para a determinação do VHP para um conjunto de dados de curta duração, assumindo que os padrões de tráfego permanecem estáveis em anos próximos em casos onde o fator K utilizado seja de um ano diferente do ano dos dados de contagem de curta duração.

Um possível procedimento para determinar a similaridade entre conjuntos de dados de postos de contagem é utilizando as curvas de VMDd. De acordo com Coelho e Rodrigues (2021), dois conjuntos de dados são semelhantes quando suas curvas de variação de VMDd normalizadas ao longo de um mês inteiro são semelhantes. A comparação é baseada na similaridade da variação de VMDd de cada curva no decorrer de todas as semanas contidas em um mês. A normalização é feita pela transformação dos valores de VMDd de cada curva de modo que sua soma seja igual a 100. As curvas normalizadas são consideradas semelhantes quando a distância euclidiana entre elas não ultrapassa um valor limite estabelecido.

Conforme colocam Han, Kamber e Pei (2012), a distância euclidiana d entre dois conjuntos de pontos $X_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$ e $X_2 = (x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n})$ é dada pela Equação 9.

$$d(X_1, X_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2} \quad (9)$$

2.7 Expansão volumétrica

De acordo com Garber e Hoel (2009), a expansão volumétrica tem como objetivo ajustar o volume de demandas observadas em postos de contagem de curta duração. Conforme coloca FHWA (2016), nos postos onde há contagem permanente, são calculados fatores utilizados para processar os dados coletados em postos de contagem sazonal. Utilizando esse conceito, é possível inferir valores de volume horário e volume médio diário para postos de curta duração a partir de postos onde foi verificada completude anual de dados.

Segundo Furlanetto (2021), a definição dos conceitos de fatores de expansão não é algo homogêneo na literatura internacional, portanto, serão utilizadas nessa seção as nomenclaturas apresentadas por Brasil (2006), que é a referência nacional para estudos relacionados à engenharia de tráfego.

Expansão diária De acordo com FHWA (2016), contagens realizadas em menos de 24 horas do dia devem ser ajustadas para valores totais diários usando o fator de expansão diária. Para pesquisas feitas em um período h de horas do dia, o fator de expansão diária é calculado pela Equação 10:

$$f_d = \frac{VMDd}{VH_h} \quad (10)$$

onde:

f_d = fator de expansão diária;

$VMDd$ = volume de carros de passeio durante as 24 horas do dia;

VH_h = volume de carros de passeio durante as h horas de pesquisa.

Expansão semanal Para determinar o fator de expansão semanal, é necessário avaliar todas as contagens disponíveis de 7 dias consecutivos e determinar os fatores de expansão médios por dia da semana. O fator de expansão semanal determinado para um dia específico, para determinado tipo de veículo, é dado pela Equação 11.

$$f_s = \frac{VMS}{VMDd} \quad (11)$$

onde:

f_s = fator de expansão semanal de um dia específico da semana;

VMS = volume de carros de passeio durante os 7 dias da semana;

$VMDd$ = volume de carros de passeio durante o dia determinado.

Consta em Brasil (2006) que os padrões de tráfego entre as semanas do mês não possuem variação, de modo que o $VMDs$ corresponde ao $VMDm$ de um respectivo mês.

Expansão mensal Para obter a expansão mensal, é necessário analisar as pesquisas existentes ao longo do ano, por isso são utilizados postos para os quais é possível verificar completude anual de dados de contagem. Para os postos nos quais foi verificada a completude, devem ser calculadas as relações de tráfego em cada mês com o tráfego médio diário do ano. Os postos de curta duração são então relacionados com os postos de completude anual, sendo assim possível obter o tráfego médio diário de cada trecho. A expansão mensal é feita usando o fator obtido para cada tipo de veículo pela Equação 12

$$f_m = \frac{VMDa}{VMDm} \quad (12)$$

onde:

f_m = fator de expansão mensal (ou sazonal);

$VMDa$ = volume médio diário anual;

$VMDm$ = volume médio diário mensal.

De acordo com Coelho e Rodrigues (2021), os cálculos de $VMDa$ para postos de curta duração envolvem a determinação do $VMDm_{ij}$ para cada mês i com dados completos e a aplicação da expansão mensal para cada classe de expansão j . Com base nos valores disponíveis de $VMDm_{ij}$ disponíveis e nos fatores de expansão mensal f_{ij} respectivos, é possível calcular o $VMDa$ com a Equação 13, de Garber e Hoel (2009).

$$VMDa = \frac{\sum_{i=1}^n (VMDm_i \times f_{m_i})}{n} \quad (13)$$

3 Área de estudo

Segundo Vasques (2002), em 1937, o Plano do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem trouxe a ideia de duas rodovias longitudinais atravessando o país, uma pelo interior e outra pelo litoral. Nesse contexto, surge o projeto de uma rodovia litorânea, que viria a se tornar a atual BR-101.

Inicialmente chamada de BR-59, teve sua construção iniciada no final dos anos 50, configurando a primeira ligação rodoviária contínua e direta em direção à capital de Santa Catarina. A construção foi concluída nos anos 70, com a construção e pavimentação da BR-101 ao longo da faixa litorânea de Santa Catarina.

Segundo Santangelo (2003), a duplicação da BR-101 foi iniciada em 1997 no trecho de Santa Catarina, para solucionar um problema que se alastrava desde os anos 80, quando o número de veículos que trafegavam na rodovia já era próximo do triplo da capacidade da via.

A Figura 8 mostra a área de estudo, que consiste no trecho da BR-101 contido no estado de Santa Catarina. No norte do estado, a rodovia atravessa a divisa entre o Paraná e Santa Catarina, e, no sul do estado, o trecho da rodovia termina na divisa com o estado do Rio Grande do Sul, com 485 quilômetros de extensão total.

Figura 8: BR-101 dentro dos limites de SC



Fonte: Elaboração própria com dados de DNIT(2023) e IBGE (2023)

O *ranking* CNT⁴ de rodovias fornece informações sobre os estados de geometria da via, do pavimento e da sinalização para as rodovias abrangidas pelo Anuário CNT do Transporte (CNT (2022)). O *ranking* discrimina as rodovias por UF, jurisdição (federal ou estadual) e gestão (pública ou concedida). A classificação para cada característica pode ser: ótimo, bom, regular ou ruim.

O trecho da BR-101 no estado de Santa Catarina ocupa a posição 22 do *ranking*, com as classificações a seguir.

- Estado geral: bom;
- Pavimento: bom;
- Sinalização: bom;
- Geometria: ótimo.

A gestão é concedida por toda a extensão da rodovia dentro do estado. Do trecho da BR-101 de Curitiba até Palhoça, a responsável pela concessão é a Autopista Litoral Sul. De Palhoça até o limite do estado com o Rio Grande do Sul, a responsável é a CCR ViaCosteira. Os contratos de concessão podem ser acessados no endereço eletrônico da ANTT⁵.

A informação a respeito do relevo (tipo de terreno) necessária para a aplicação do método do HCM 6, como visto na Seção 2.2.5, pode ser encontrada na base de dados pública do PNCT “Estimativa do Volume Médio Diário Anual – VMDa”⁶. Nesta fonte, esta informação é disponibilizada por meio de uma planilha eletrônica, a nível de segmento do SNV. A Tabela 8 mostra a planilha de dados desta fonte para o ano de 2021, onde pode ser visualizada a coluna “RELEVO_PRE”⁷. As classificações de “Plano” e “Ondulado” coincidem com os tipos genéricos do HCM.

A tabela mostra que nesse conjunto de dados existe também uma coluna chamada “VELOCIDADE”. Comparando os valores que ali constam com a sinalização vertical de velocidade regulamentar observada no *Google Street View*, é considerado que se trate de valores de velocidade regulamentar⁸.

⁴<<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/painel>>, acesso em 05/05/2023

⁵Disponível em <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes>>, acesso em 07/05/2023.

⁶<<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/Modelagem>>

⁷Não pode ser encontrada na Nota Técnica associada a esta planilha, também disponível no *site*, informação a respeito do que significa a sigla “PRE” que consta no nome da coluna com a informação de relevo.

⁸Na Nota Técnica que acompanha os dados, também não consta esta informação.

Tabela 8: Planilha eletrônica fornecida pelo estudo de VMDa do PNCT

REGIAO	UF	EXTENSAO	CODIGO_SNV-SRE	JURISDICA0	RELEVO_PRE	VELOCIDADE
Sul	SC	8,65	101BSC4290	Federal	Plano	110
Sul	SC	19,46	101BSC4290	Federal	Plano	110
Sul	SC	10,9	101BSC4250	Federal	Plano	110
Sul	SC	10,35	101BSC4242	Federal	Plano	110
Sul	SC	7,23	101BSC4235	Federal	Plano	110
Sul	SC	21,26	101BSC4230	Federal	Ondulado	100
Sul	SC	10,7	101BSC4220	Federal	Plano	110
Sul	SC	11,33	101BSC4210	Federal	Plano	110
Sul	SC	6,77	101BSC4200	Federal	Ondulado	100
Sul	SC	2,87	101BSC4200	Federal	Ondulado	100
Sul	SC	10,04	101BSC4200	Federal	Ondulado	100
Sul	SC	3,11	101BSC4180	Federal	Ondulado	100
Sul	SC	3,21	101BSC4170	Federal	Plano	110
Sul	SC	4,93	101BSC4180	Federal	Plano	110
Sul	SC	13,45	101BSC4175	Federal	Ondulado	100
Sul	SC	14,6	101BSC4140	Federal	Plano	110
Sul	SC	5,31	101ASC2005	Federal	Ondulado	70
Sul	SC	9,49	101BSC4140	Federal	Plano	110

3.1 Postos de contagem do PNCT

Na BR-101, em Santa Catarina, constam 8 postos de contagem no sistema do PNCT. As informações acerca desses postos podem ser encontradas na Tabela 9. A quilometragem começa em 0 na divisa do Paraná com Santa Catarina, aumentando no sentido norte-sul, ou seja, o quilômetro 13 está no norte do estado, e o quilômetro 405, no sul.

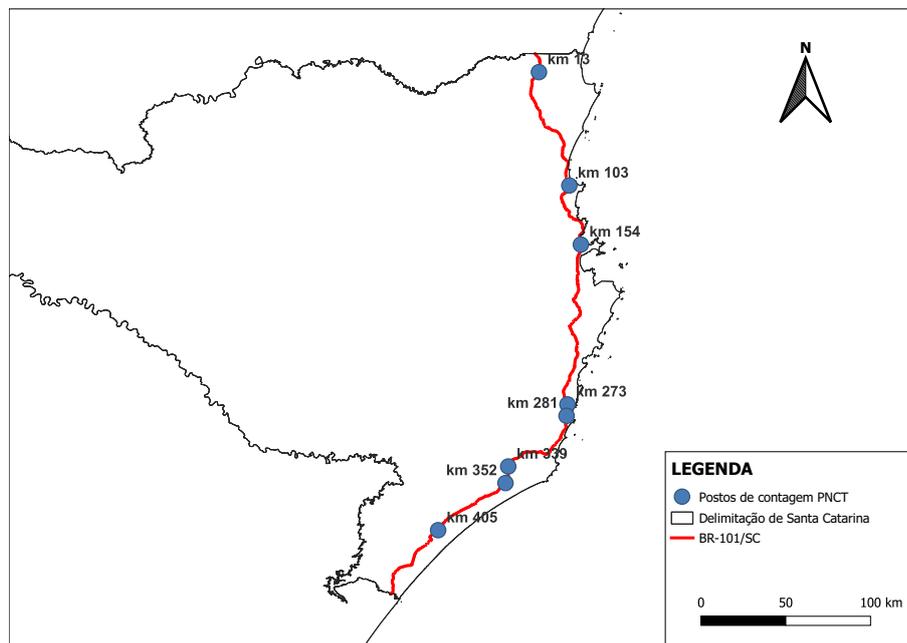
Tabela 9: Postos de contagem do PNCT na BR-101/SC

Quilometragem	Município	Coordenada Geográfica (Lat. Long.)	
13	Garuva	-26.095	-48.866
103	Balneário Piçarras	-26.791	-48.680
154	Porto Belo	-27.153	-48.610
273	Imbituba	-28.135	-48.692
281	Imbituba	-28.205	-48.698
339	Tubarão	-28.516	-49.053
352	Jaguaruna	-28.618	-49.070
405	Araranguá	-28.907	-49.480

Fonte: PNCT

A Figura 9 mostra os postos de contagem sobre o trecho da BR-101/SC, de acordo com suas coordenadas geográficas.

Figura 9: Localização dos postos de contagem na BR-101/SC

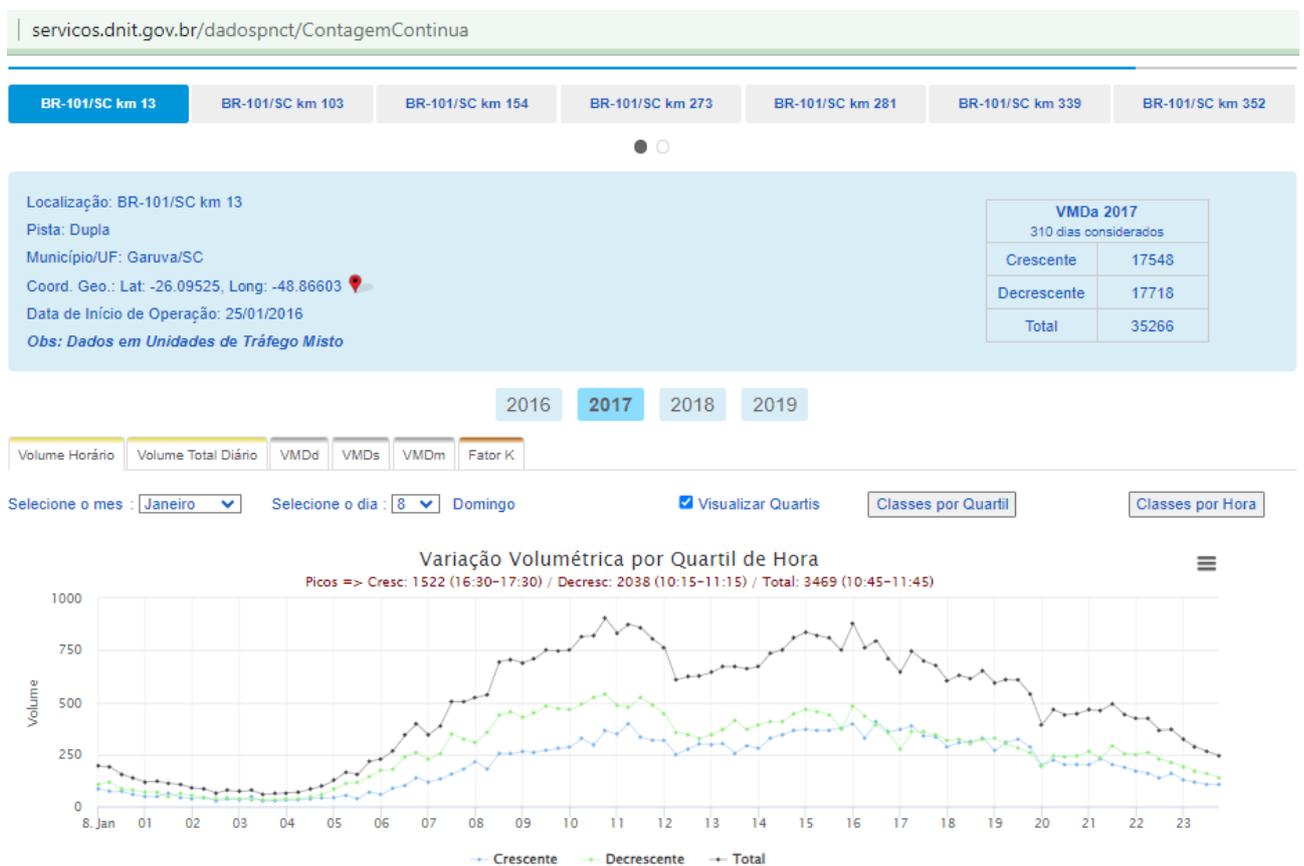


Fonte: Adaptado de PNCT e IBGE(2023)

Os dados de contagem de tráfego são disponibilizados em planilhas eletrônicas. O *site* também apresenta recursos visuais para apresentar os dados de contagem. A Figura 10 traz um exemplo de como os dados são apresentados. No endereço eletrônico do PNCT, a Tabela 10 apresenta o formato em que os dados são disponibilizados. Na coluna sentido, o sentido "C", crescente, representa o volume de veículos que percorreu o sentido norte-sul da rodovia, e o sentido "D", decrescente, o sentido sul-norte.

Nessa seção, foram apresentados dados que serão aplicados no método do HCM 6, como o tipo de terreno e a velocidade regulamentar. Os dados da velocidade de fluxo livre não foram encontrados em dados abertos, portanto, devem ser estimados. Uma possível fonte para esses dados seria as concessionárias da rodovia. O FHP não consta nos dados do DNIT. Os dados de volume, no formato em que são dispostos, permitem o cálculo da porcentagem de veículos pesados na rodovia. A obtenção de dados geométricos como a largura das faixas e a desobstrução lateral por meio de imagens de satélite será abordada no decorrer do trabalho.

Figura 10: Representação gráfica dos dados de contagem no endereço eletrônico do PNCT



Fonte: PNCT

Tabela 10: Formato em que os dados para *download* são disponibilizados no endereço eletrônico do PNCT

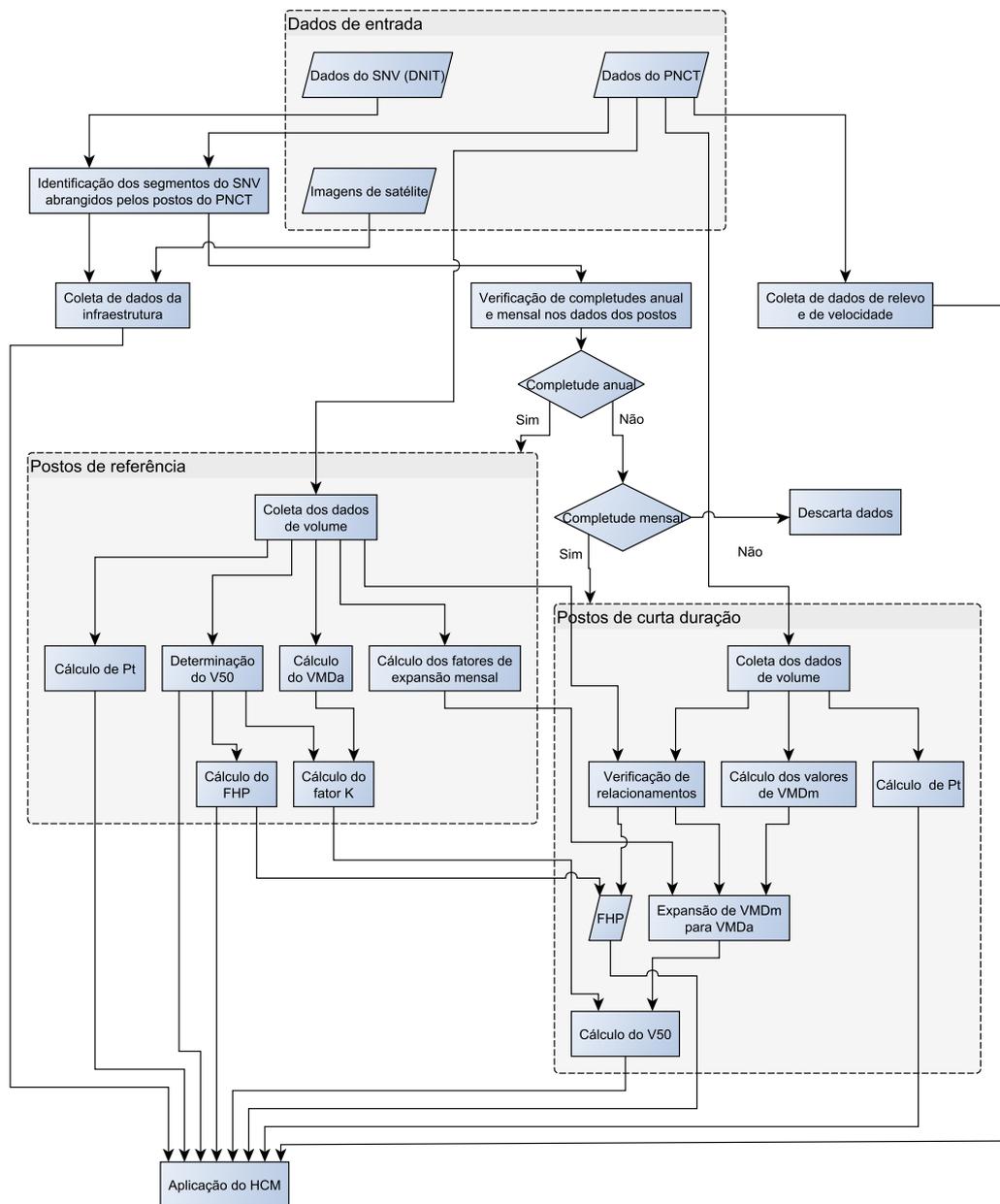
Distribuição de Classes de Veículos por Quartil														
Download Excel														
Volume por Quartil de Hora - 1 / Fevereiro / 2016 - BR-101/SC km 405														
Hora	Quartil (min)	Sentido	VHQ	Classe										
				(A) Ônibus/Cam de 2 eixos	(B) Ônibus/Cam de 3 eixos	(C) Caminhão de 4 eixos	(D) Caminhão de 5 eixos	(E) Caminhão de 6 eixos	(F) Caminhão de 7 eixos	(G) Caminhão de 8 eixos	(H) Caminhão de 9 eixos	(I) Passeio	(J) Moto	(L) Outros
0	00-15	C	72	5	6	6	1	10	1	0	0	41	0	2
		D	146	3	11	3	2	6	1	0	0	117	1	2
		Total	218	8	17	9	3	16	2	0	0	158	1	4
	15-30	C	75	5	5	6	4	6	1	0	0	44	3	1
		D	98	3	9	3	3	6	1	0	0	71	1	1
		Total	173	8	14	9	7	12	2	0	0	115	4	2
	30-45	C	63	3	7	5	5	7	1	0	0	33	1	1
		D	102	5	13	2	1	0	1	0	0	75	1	4
		Total	165	8	20	7	6	7	2	0	0	108	2	5
	45-60	C	66	3	3	6	2	9	2	0	0	39	0	2
		D	86	4	12	2	2	6	3	0	1	55	1	0
		Total	152	7	15	8	4	15	5	0	1	94	1	2

Fonte: PNCT

4 Método

A Figura 11 apresenta o fluxograma dos processos do método empregado neste trabalho. O fluxograma apresenta de forma minuciosa as fontes de dados utilizadas, a lógica de trabalho com os dados dos postos do PNCT quanto à sua completude anual ou mensal e todos os processos envolvidos com a determinação de cada um dos dados necessários para a aplicação do HCM. No decorrer deste capítulo, são apresentados os detalhes.

Figura 11: Fluxograma do método



4.1 Materiais

Esta Seção apresenta os *softwares* e bibliotecas da linguagem de programação Python utilizadas neste trabalho.

Os recursos de *software* utilizados são:

1. **QGIS:** o Quantum GIS⁹ (QGIS) é um *software* de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) de código aberto. Neste trabalho, é utilizada a versão 3.22.10 para processar os dados geográficos da área de estudo e também para apresentar os resultados;
2. **pandas:** a biblioteca *pandas*¹⁰ é uma ferramenta para análise e manipulação de dados em Python. Com ela, é possível ler, limpar, transformar, analisar e visualizar dados de forma eficiente, seja em tabelas, séries temporais ou qualquer outra estrutura de dados tabulares. Para a biblioteca *pandas*, a versão utilizada foi a 1.5.3. A versão do Python utilizada para interpretar os códigos é a 3.11.3;
3. **requests:** a biblioteca *requests*¹¹ envia solicitações a servidores e recebe respostas. É utilizada para realizar operações de comunicação com *Application Programming Interfaces* (APIs) e realizar *web scraping*. Neste trabalho, a biblioteca foi utilizada para extrair os dados dos postos de contagem do API do endereço eletrônico do PNCT. Um API, por sua vez, é um meio de comunicação entre diferentes sistemas de *software*, permitindo que aplicativos possam interagir e compartilhar informações de forma padronizada e segura;
4. **Microsoft Excel:** o Microsoft Excel¹² é uma ferramenta de planilha eletrônica utilizada para análise e organização de dados numéricos. Seu uso principal é permitir aos usuários realizar cálculos, visualizações e análises de dados de maneira eficiente e flexível, por meio de recursos como fórmulas e gráficos;
5. **HCM-CALC:** o HCM-CALC¹³ é um *software* de modelagem de capacidade de rodovias utilizado na engenharia de transportes para avaliar a capacidade de tráfego de uma rodovia. Ele utiliza os métodos do HCM para estimar a capacidade da via com base em suas características e condições de fluxo de tráfego.

⁹<https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html>

¹⁰<<https://pandas.pydata.org>>

¹¹<<https://pypi.org/project/requests/>>

¹²<<https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>>

¹³<<http://swashware.com/HCMCalc/>>

4.2 Seleção dos segmentos homogêneos

O primeiro passo a ser tomado para a aplicação do método HCM 6 é a seleção dos segmentos homogêneos abrangidos pelos postos de contagem da área de estudo. Os processos são realizados no QGIS. O arquivo *shapfile* da malha do SNV, em sua versão "202301B", é inserido no *software*, juntamente com o SHP de delimitação das Unidades Federativas do Brasil.

Primeiramente, por meio da tabela de atributos, são identificados todos os segmentos pertencentes à BR-101 no estado de Santa Catarina, filtrando as colunas "vl_br" e "sg_uf".

Após a identificação da área de estudo, os postos de contagem do PNCT são inseridos em um arquivo SHP do tipo ponto. O resultado é mostrado na Figura 9 da Seção 3.

Com os pontos inseridos, é possível identificar, com auxílio do QGIS, o segmento do SNV que é abrangido por cada posto de contagem, completando o processo da obtenção dos segmentos homogêneos objetos de estudo.

4.3 Verificação de completude dos postos de contagem

Para extrair os dados de demanda para cada segmento, primeiramente, é verificada a completude dos postos de contagem. A verificação de completude é realizada por meio do *script* de Python que consta no Apêndice A. Um posto é considerado completo quando possui dados de contagem para cada 15 minutos de todas as horas do dia, para todos os dias do ano. Caso seja verificada a completude, ele é utilizado como posto de referência, do contrário, é considerado posto de curta duração. O *script* também informa para quais meses dos postos há completude mensal de dados, ou seja, para quais meses há dados de contagem para cada 15 minutos de todas as horas do dia, para o mês inteiro.

Os dados de entrada do *script* são o ano da contagem e o código do posto. O código do posto não é mostrado na interface do sistema. Ele deve ser obtido realizando uma inspeção de elemento no código fonte da página do PNCT. Isso pode ser feito com o auxílio da ferramenta "Rede"¹⁴, da função "Inspeccionar Elemento" do navegador. Dessa forma, cada vez que um posto é selecionado, a resposta do servidor com o código do posto aparece na tela, conforme mostra a Figura 13.

Para verificar a completude do posto para o ano, é necessário mudar as variáveis "ano" e "posto" manualmente no *script*. A execução do código apresenta como resultado final uma tabela semelhante à do Quadro 1 para um posto com dados incompletos para o ano, e à do Quadro 2, para um posto com dados completos para o ano inteiro.

¹⁴Em alguns navegadores, a aba pode aparecer com o termo em inglês "Network".

Figura 12: Filtros aplicados na seção de contagem contínua do PNCT

The screenshot shows the web interface for continuous counting on the PNCT website. At the top, there is a navigation bar with 'BRASIL', 'CORONAVÍRUS (COVID-19)', and links for 'Simplifique!', 'Participe', 'Acesso à informação', 'Legislação', and 'Canais'. Below this is the DNIT logo and the PNCT logo. The main content area includes a breadcrumb trail: 'Página Inicial / Dados de Tráfego / Contagem Continua'. A map of Brazil is displayed on the left, with the state of Santa Catarina (SC) highlighted. To the right of the map is a filter section titled 'Filtrar Postos' with a dropdown menu set to 'SC' and a search button labeled 'Buscar'. Below the filter section, a list of selected posts is shown, including 'BR-101/SC km 13', 'BR-101/SC km 103', 'BR-101/SC km 154', 'BR-101/SC km 273', 'BR-101/SC km 281', 'BR-101/SC km 339', and 'BR-101/SC km 352'.

Figura 13: Identificação do código do posto de contagem no API

The screenshot shows the Network tab in a browser's developer tools. The 'rawline' request is selected, and the URL parameters are visible. The parameters include 'idequipamento=426&_=' followed by a long alphanumeric string. The 'rawline' checkbox is checked, and the 'rawline' text is highlighted in red. The 'rawline' text is also highlighted in red in the original image.

Name
<input checked="" type="checkbox"/> rawline
<input type="checkbox"/> GetAnoMesesEquipamento?idequipamento=426&_= <u>1686768930964</u>
<input type="checkbox"/> 426?ano=2017&_= <u>1686768930965</u>
<input type="checkbox"/> GetAnoMesesEquipamento?idequipamento=426&_= <u>1686768930966</u>

Quadro 1: Exemplo de resultado do *script* de verificação de completude para um posto de curta duração

MES	COMPLETUDE
1	COMPLETO
2	COMPLETO
3	COMPLETO
4	INCOMPLETO
5	COMPLETO
6	INCOMPLETO
7	COMPLETO
8	INCOMPLETO
9	COMPLETO
11	COMPLETO
12	COMPLETO
POSTO	INCOMPLETO

Quadro 2: Exemplo de resultado do *script* de verificação de completude para um posto de contagem contínua

MES	COMPLETUDE
1	COMPLETO
2	COMPLETO
3	COMPLETO
4	COMPLETO
5	COMPLETO
6	COMPLETO
7	COMPLETO
8	COMPLETO
9	COMPLETO
11	COMPLETO
12	COMPLETO
POSTO	COMPLETO

O número de identificação do posto no servidor, a localização do posto de contagem dentro da rodovia e os dados de completude são registrados em planilhas eletrônicas. O *script* não registra os dados do posto, ele apenas realiza a verificação de completude mensal e anual e imprime na tela.

O *script* é executado para todos os postos de contagem da área de estudo, para todos os anos com dados de contagem disponíveis.

4.4 Obtenção dos dados de volume

A obtenção dos dados de volume é realizada com auxílio do *script* de Python que consta no Apêndice B. Os dados de entrada do *script* são o ano para o qual se quer extrair os dados e o código do posto no API. A execução do *script* faz o *download* de dados para todos os dias com dados completos de contagem, independente de haver completude anual ou mensal, diretamente do API do endereço eletrônico do PNCT. Os dados extraídos são inseridos em um único arquivo do tipo .csv.

Antes de ser executado, o *script* precisa que seja criada uma pasta no computador com o nome "Posto_X", onde X é o número de identificação do posto de contagem no API do PNCT. É criada uma pasta para os dados de cada posto de contagem, de forma que o *script* possa extrair os dados corretamente para a pasta respectiva a cada posto.

4.5 Verificação de relacionamento entre postos de referência e postos de curta duração

O método para determinação de similaridade utilizado é o de comparação de curvas de variação de VMDd ao longo dos dias do mês, apresentado na Seção 2.6.1. Esse estudo considera que o fluxo de tráfego é estável em anos próximos, e que a variação volumétrica temporal nos postos de contagem permanente é semelhante à dos postos de curta duração, sendo que esta variação permanece estável durante o horizonte de projeto. Assim, fatores de expansão e o fator K podem ser utilizados entre anos diferentes, permitindo que a relação seja encontrada entre dados de anos diferentes.

A verificação de relacionamento entre postos de referência e postos de curta duração é realizada com auxílio de planilha eletrônica. A determinação de relacionamento é realizada conforme o método apresentado por Coelho e Rodrigues (2021), abordado na Seção 3.1. No caso do presente trabalho, caso o posto de curta duração possua mais de um mês com dados completos, o critério de escolha do mês para comparação do VMDd é arbitrário.

Com o mês para o qual será feita a determinação de relacionamento entre os postos de referência e o posto de curta duração definido, é realizada a filtragem de dados necessários para a comparação das curvas de VMDd. Neste trabalho, é utilizado o volume não-classificado para estabelecer as curvas.

Primeiramente, são filtrados os dados para o mês escolhido dos postos de referência. A filtragem é realizada por mês e por sentido, ou seja, os dados são filtrados de maneira que se obtenha os dados de volume para o mês determinado para a verificação de relacionamento separados por sentido crescente e decrescente. O mesmo procedimento é feito para o posto de curta duração para o qual a verificação de relacionamento é realizada.

Com os dados para o mês de análise separados por sentido, são calculados os VMDd para cada posto. O VMDd é dado pela soma dos volumes de todas as classes de veículos para todas as horas do dia, para cada dia do mês. Portanto, para um mês de 30 dias, são calculados 30 valores de VMDd.

Após o cálculo dos VMDd de cada posto, os dados de contagem devem ser normalizados para cada dia do mês, isto é, fazer com que os valores de VMDd de todos os dias do mês somados

resultem em 100. Esse valor foi escolhido arbitrariamente para que os valores resultantes não fossem decimais. A Equação 14 mostra como os dados são normalizados:

$$VMDd_{ni} = \frac{VMDd_i \cdot 100}{VMDd_{total}} \quad (14)$$

onde:

$VMDd_{ni}$ é o $VMDd$ normalizado para o dia i ;

$VMDd_i$ é o $VMDd$ do dia i ;

$VMDd_{total}$ é a soma de todos os $VMDd$ do mês.

Com os dados normalizados, é aplicada a Equação 9. Para este trabalho, o limite da distância euclidiana admitido foi de $3,0^{15}$. Caso a distância esteja abaixo do limite para mais de um posto de referência, é adotado o posto que apresentou a menor distância para ser relacionado com o posto de curta duração. Caso o limite seja ultrapassado para o sentido de análise para todos os postos de referência, a análise do nível de serviço para este sentido é descartada.

4.6 Cálculo do fator K e do FHP para os postos de referência

Os cálculos do fator K e do FHP são realizados somente para os postos de referência. O cálculo é feito por sentido, de forma que cada sentido de tráfego para cada posto de referência possua um fator K e um FHP para posterior aplicação nos postos de curta duração. Não é aplicado nenhum fator de conversão para ônibus e caminhões. O volume usado para o cálculo dos fatores é o quinquagésimo maior volume horário do mês analisado.

Os cálculos de são feitos por meio das Equações 15 e 16, com auxílio de planilha eletrônica.

$$K = \frac{VH_{50}}{VMDa} \quad (15)$$

onde:

VH_{50} = Volume horário da quinquagésima hora;

$VMDa$ = Volume médio diário anual.

$$FHP = \frac{VH_{50}}{V15_{max} \cdot 4} \quad (16)$$

onde:

VH_{50} = Volume horário da quinquagésima hora;

¹⁵No trabalho de Coelho e Rodrigues (2021), a distância euclidiana admitida foi de 2,0.

$V15_{max}$ = Maior volume de veículos contados em um período de 15 minutos dentro da quinquagésima hora.

4.7 Expansão volumétrica nos postos de curta duração

A expansão volumétrica dos postos de curta duração exige, primeiramente, o cálculo dos fatores de expansão mensal dos postos de referência. Os fatores são calculados para volume não-classificado, por meio da Equação 12, em planilha eletrônica.

De posse dos fatores de expansão mensal dos postos de referência, devem ser calculados os VMDm para cada mês dos postos de curta duração que possuam completude nos dados de contagem. O resultado do VMDa expandido nesses postos é dado pela Equação 13. Os fatores de expansão utilizados devem ser os referentes ao posto para o qual foi verificado o relacionamento entre os postos de contagem.

Determinação do VHP Para obtenção do Volume Horário de Projeto (VHP), que é utilizado no cálculo do nível de serviço, o fator K do posto de referência é aplicado ao VMDa expandido do posto de curta duração.

4.8 Cálculo da proporção de veículos pesados

O cálculo do Pt é realizado para todos os meses em que há completude dos dados de contagem, individualmente. Não foram levadas em consideração variações sazonais, logo, o cálculo é feito para uma média dos dados disponíveis no posto.

Os volumes da classe A até a classe H são considerados como volume de veículo pesado. Os volumes das classes I, J e L são considerados como sendo de veículo de passeio, o que inclui a classe “moto” e “outros”, com fator de conversão igual a 1. Foi considerado que os veículos dessas classes se comportam como veículos de passeio no fluxo de tráfego.

Com auxílio de planilha eletrônica, o volume de veículos pesados contados em um mês é dividido pelo volume total de veículos contados no mês e transformado em porcentagem, resultando no valor de Pt. Realizado o cálculo de Pt para todos os meses onde há dados completos disponíveis, é feita uma média simples entre esses valores. A resultante da média é utilizada como valor de Pt representativo para o sentido de análise do segmento.

4.9 Levantamento das características geométricas da via

Largura de faixa e desobstrução lateral total O *Google Earth Pro* não oferece resolução espacial de imagem suficiente para determinar a largura de faixa da rodovia e a desobstrução lateral total com exatidão, portanto, nesse estudo, os valores utilizados serão os valores inteiros mais próximos, arredondados para cima, obtidos com auxílio da ferramenta “Régua” do *software*, em pés.

Tipo de divisão Para o tipo de divisão, será observada a divisão existente no segmento com auxílio da ferramenta “Street View”.

Densidade de pontos de acesso Para a densidade de pontos de acesso, é contada a quantidade de pontos de acesso que podem influenciar no fluxo de tráfego do segmento. Pontos de acesso que passam despercebidos pelo motorista não são considerados. O resultado final é dividido pela extensão do segmento, em milhas.

Tipo de terreno O tipo de terreno é obtido no estudo de estimativa do VMDa disponibilizado no endereço eletrônico do PNCT, conforme é apresentado na Seção 3.

BFFS A BFFS também é obtida no estudo de estimativa do VMDa do PNCT. A velocidade regulamentar disponibilizada deve ser transformada de km/h para mi/h , e o valor transformado deve ser acrescido em $5 mi/h$ caso seja maior do que $50 mi/h$, ou em $7 mi/h$ caso o valor seja menor do que $50 mi/h$, conforme colocado na Seção 2.2.2

4.10 Cálculo do nível de serviço utilizando o *software* HCM-CALC

Os resultados obtidos durante o método são aplicados no *software* HCM-CALC. A Figura 14 mostra a tela inicial do *software*. Nesse estudo, é utilizada a sexta versão do HCM, bem como o tipo de rodovia “*multilane highway segment*” (segmento de rodovia de múltiplas faixas). A Figura 15 mostra um exemplo de aplicação, com os campos preenchidos com dados de entrada e sendo apresentados o nível de serviço resultante.

Figura 14: Tela inicial do HCM-CALC, com as opções utilizadas no estudo selecionadas

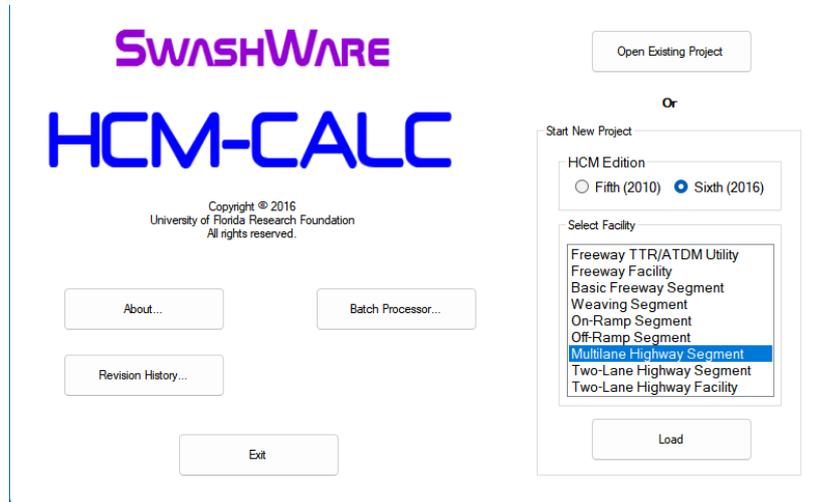
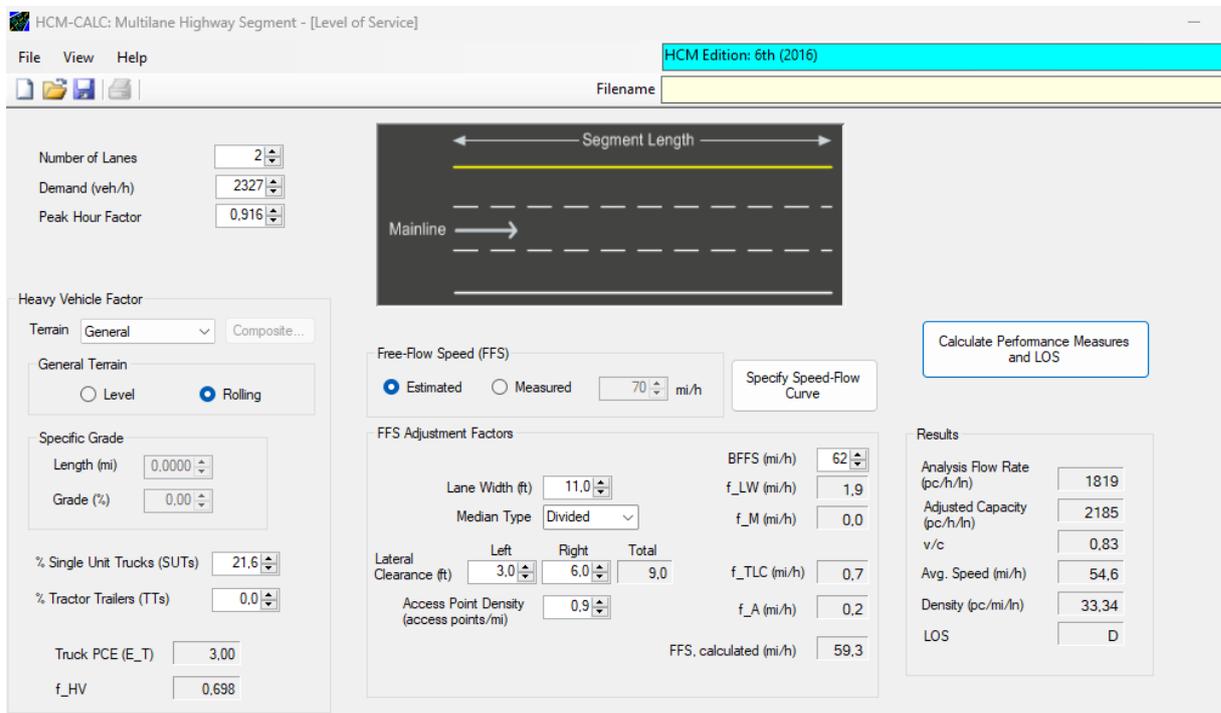


Figura 15: Dados de entrada do HCM-CALC para o cálculo do nível de serviço de rodovias de múltiplas faixas



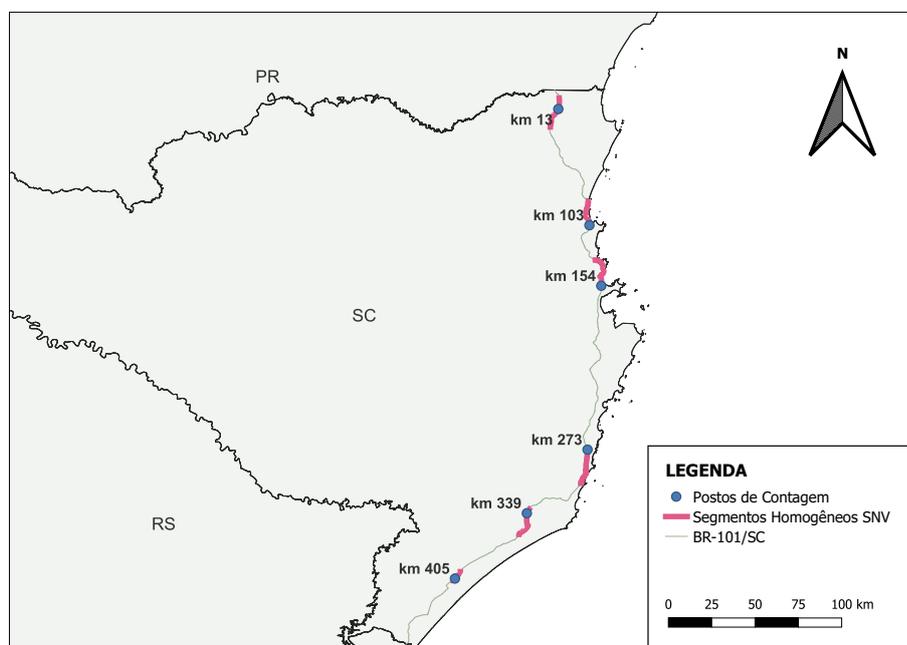
5 Resultados

Essa seção apresenta os resultados da aplicação do método na área de estudo. Por fim, é apresentada a Tabela 22, que contém todos os resultados relacionados ao nível de serviço para os segmentos estudados. O resultado também é apresentado visualmente por meio da Figura 24.

5.1 Segmentos homogêneos

A localização dos postos de contagem na rodovia, bem como o segmento abrangido por cada posto, é apresentada na Figura 16.

Figura 16: Segmentos homogêneos abrangidos pelos postos de contagem do PNCT em SC



Em dois casos, o mesmo segmento foi abrangido por dois postos de contagem:

- para os postos do quilômetro 273 e do quilômetro 281, no segmento 4 da rodovia;
- para os postos do quilômetro 339 e do quilômetro 352, no segmento 5 da rodovia.

Os postos escolhidos para representar os segmentos foram os do quilômetro 273 e o do quilômetro 339, pois, quando comparados com o outro posto do mesmo segmento, possuíam mais dados de contagem mais atuais. Dessa forma, os dados dos postos dos quilômetros 281 e 352 não foram utilizados nesse estudo. O descarte desses postos não significa, no entanto, que eles não possam ser utilizados em outros estudos.

A identificação adotada para cada segmento, sua extensão e o posto de contagem que o abrange constam na Tabela 11. Como todos os segmentos se encontram em extensões com mais de 3,2 km (2mi) entre pontos de interrupção de tráfego, todos podem ser utilizados na aplicação do método do HCM 6 para rodovias de múltiplas faixas.

A Figura 17 mostra os segmentos homogêneos com imagens de satélite ao fundo, bem como a localização do posto de contagem no segmento.

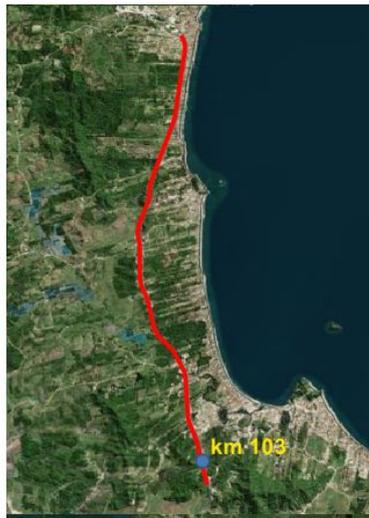
Tabela 11: Dados relativos à identificação dos segmentos homogêneos

Id. do segmento	Posto de contagem	Extensão do segmento (km)
Segmento 1	km 13	21,0
Segmento 2	km 103	17,1
Segmento 3	km 154	22,0
Segmento 4	km 273	26,0
Segmento 5	km 339	20,3
Segmento 6	km 405	7,0

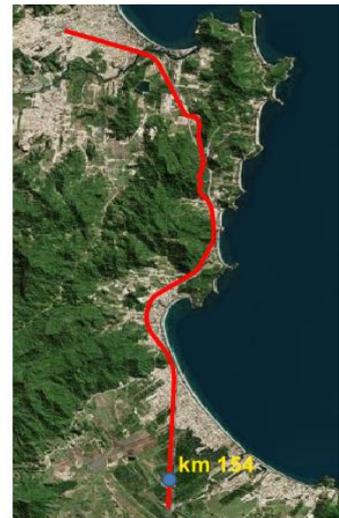
Figura 17: Segmentos homogêneos na área de estudo, identificados em vermelho



(a) Segmento 1



(b) Segmento 2



(c) Segmento 3



(d) Segmento 4



(e) Segmento 5



(f) Segmento 6

5.2 Completudes mensais e anuais dos dados dos postos do PNCT

Primeiramente, foram verificados os códigos de cada posto de contagem nos códigos das páginas no PNCT, bem como os anos com dados disponíveis de contagem. Os resultados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12: Códigos dos postos de contagem no código fonte e anos com dados disponíveis

Posto (km)	Código	Anos disponíveis
km 13	428	2016, 2017, 2018, 2019
km 103	512	2017
km 154	456	2016, 2017
km 273	229	2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019
km 339	228	2014, 2015, 2016, 2017, 2018
km 405	4211016	2021, 2022

O *script* do Apêndice A foi executado para todos os códigos e anos com dados disponíveis. Como resultado, dois postos apresentaram completude anual de dados:

- posto do km 13, para o ano de 2019;
- posto do km 273, para os anos de 2016 e 2019.

Portanto, os postos de referência utilizados para as etapas posteriores do método são os do km 13 e do km 273, referentes aos segmentos 1 e 4, respectivamente. Para o posto do segmento 4, são utilizados os dados de contagem do ano de 2019, por serem mais recentes.

Os postos dos km 103, 154, 339 e 405 são considerados de curta duração, por não possuírem completude anual de dados. O *script* verifica a completude mensal dos dados dos postos, para que seja possível verificar a possibilidade de relacionamento entre postos de referência e de curta duração. A verificação é realizada para todos os anos disponíveis, porém, como o ano com dados completos para ambos os postos de referência foi o de 2019, nesse capítulo são utilizados somente os resultados de completude mensal para o ano mais próximo de 2019 possível dos postos de curta duração. A Tabela 13 mostra os meses para os quais foi verificada a completude mensal. O símbolo X significa que não foi verificada completude mensal para o respectivo mês. O símbolo \checkmark significa que a completude foi verificada.

Tabela 13: Verificação de completude mensal para os posto de contagem de curta duração

Posto	km 103	km 154	km 339	km 405
Ano considerado	2017	2017	2018	2021
Mês	Completude			
Janeiro	X	X	X	X
Fevereiro	X	√	X	X
Março	X	√	√	X
Abril	X	√	√	X
Maio	X	X	X	X
Junho	X	X	√	X
Julho	X	√	X	X
Agosto	√	X	X	X
Setembro	X	X	X	√
Outubro	X	X	X	√
Novembro	X	√	X	X
Dezembro	X	X	X	√

5.3 Dados de volume

Os dados de volume foram extraídos por meio do API do PNCT com a execução do *script* do Apêndice B. Os dados foram salvos pelo *script* em pastas criadas antes da sua execução, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18: Pastas onde foram salvos os dados de volume

Posto_228	20/05/2023 22:46	Pasta de arquivos
Posto_229	14/05/2023 22:21	Pasta de arquivos
Posto_426	20/05/2023 22:42	Pasta de arquivos
Posto_428	10/05/2023 21:22	Pasta de arquivos
Posto_512	20/05/2023 22:32	Pasta de arquivos
Posto_421016	20/05/2023 22:49	Pasta de arquivos

O formato em que os dados são dispostos no arquivo .csv pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14: Formato em que estão dispostos os dados obtidos no PNCT

	idSumVQH	idEquipamento	sentido	ano	mes	dia	hora	quartoHora	data	valorVQH	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	l
0	33901596	228	C	2018	1	2	0	1	2018-01-02T00:00:00	129	0	4	2	0	2	1	0	0	117	0	3
1	33901481	228	D	2018	1	2	0	1	2018-01-02T00:00:00	95	1	4	1	2	0	0	1	1	85	0	0
2	33901748	228	C	2018	1	2	0	2	2018-01-02T00:15:00	135	1	7	2	0	1	1	0	1	119	1	2
3	33901981	228	D	2018	1	2	0	2	2018-01-02T00:15:00	79	0	3	1	1	0	0	0	0	72	2	0
4	33902257	228	C	2018	1	2	0	3	2018-01-02T00:30:00	127	5	13	8	6	9	1	0	0	81	3	1
5	33902180	228	D	2018	1	2	0	3	2018-01-02T00:30:00	76	0	4	0	1	1	0	0	0	66	1	3
6	33902765	228	C	2018	1	2	0	4	2018-01-02T00:45:00	120	4	16	7	9	6	2	0	0	73	2	1
7	33902640	228	D	2018	1	2	0	4	2018-01-02T00:45:00	61	1	2	1	0	2	2	0	2	48	2	1
8	33903109	228	C	2018	1	2	1	1	2018-01-02T01:00:00	120	4	14	8	8	8	1	0	0	72	1	4
9	33902882	228	D	2018	1	2	1	1	2018-01-02T01:00:00	56	1	6	3	3	3	0	0	0	36	2	2
10	33903391	228	C	2018	1	2	1	2	2018-01-02T01:15:00	115	2	5	4	0	0	0	0	1	102	1	0
11	33903472	228	D	2018	1	2	1	2	2018-01-02T01:15:00	50	1	2	2	0	1	0	0	0	44	0	0
12	33903674	228	C	2018	1	2	1	3	2018-01-02T01:30:00	108	7	14	13	9	11	1	0	0	49	2	2
13	33903798	228	D	2018	1	2	1	3	2018-01-02T01:30:00	42	1	4	1	0	3	0	0	0	33	0	0
14	33904270	228	C	2018	1	2	1	4	2018-01-02T01:45:00	102	5	9	11	5	7	0	0	0	62	1	2
15	33904039	228	D	2018	1	2	1	4	2018-01-02T01:45:00	57	2	4	2	0	2	0	0	0	47	0	0
16	33904620	228	C	2018	1	2	2	1	2018-01-02T02:00:00	91	5	13	6	9	7	0	0	0	45	1	5
17	33904547	228	D	2018	1	2	2	1	2018-01-02T02:00:00	38	2	2	2	1	0	0	0	0	30	0	1
18	33905126	228	C	2018	1	2	2	2	2018-01-02T02:15:00	78	3	11	5	5	7	1	0	1	43	1	1

5.4 Verificação de relacionamento entre os postos de referência e de curta duração

Os meses com completude mensal adotados neste trabalho arbitrariamente para a verificação de relacionamento com os postos de referência foram os seguintes:

- posto do km 103: mês 8 (agosto);
- posto do km 154: mês 7 (julho);
- posto do km 339: mês 6 (junho);
- posto do km 405: mês 9 (setembro).

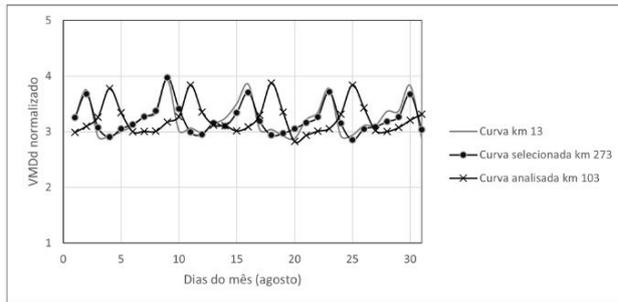
As distâncias euclidianas d obtidas pela Equação 9 para o relacionamento entre os postos de curta duração e os postos de referência são apresentadas na Tabela 15. Na Tabela, “PR” significa posto de referência, e “CD” significa curta duração. Os valores que representam a menor distância euclidiana d dentro do limite de 3,0 foram destacados em cinza claro, sendo os valores para os postos adotados. Já os valores que extrapolaram o limite de 3,0 foram destacados em cinza escuro. Para os sentidos em que não foram verificadas distâncias euclidianas d menores do que 3,0 para a verificação de similaridade, os dados foram descartados. A Tabela 15 também mostra o posto de referência adotado para cada posto de curta duração.

Tabela 15: Distâncias euclidianas calculadas para o relacionamento dos postos de referência e curta duração

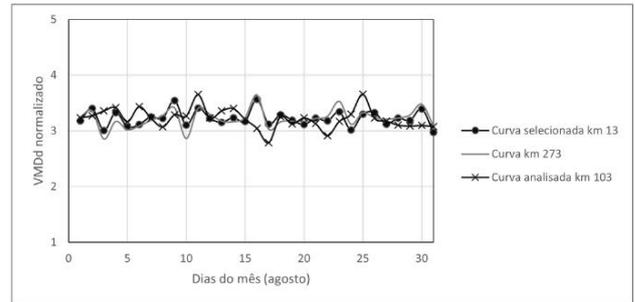
Posto CD	Sentido	d PR km 13	d PR km 273	Posto de referência adotado
km 103	C	2,719	2,584	km 273
	D	1,170	1,369	km 13
km 154	C	2,635	2,487	km 273
	D	1,561	1,552	km 273
km 339	C	2,897	2,564	km 273
	D	4,792	4,844	–
km 405	C	3,033	3,726	–
	D	4,466	4,151	–

A Figura 19 mostra a comparação das curvas de VMDd normalizadas para os postos analisados, nos sentidos crescente e decrescente. Foram comparadas as curvas de VMDd dos postos de referência no mesmo sentido de análise que as curvas de VMDd nos postos de curta duração.

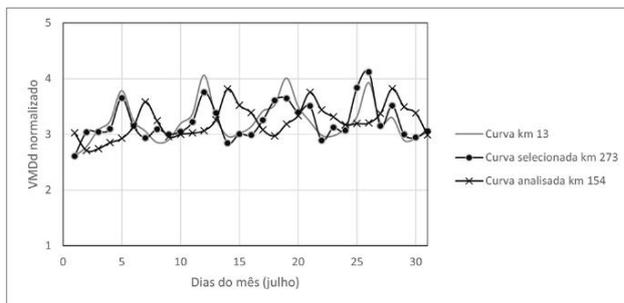
Figura 19: Comparação das curvas normalizadas para verificação de similaridade entre postos de referência e postos de curta duração



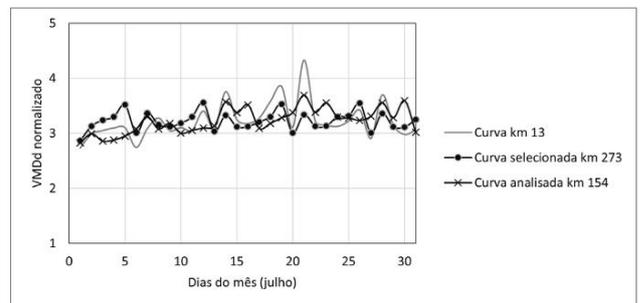
(a) Análise das curvas normalizadas para o sentido crescente para o posto do km 103



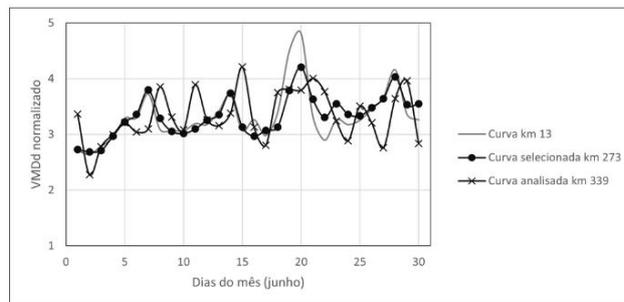
(b) Análise das curvas normalizadas para o sentido decrescente para o posto do km 103



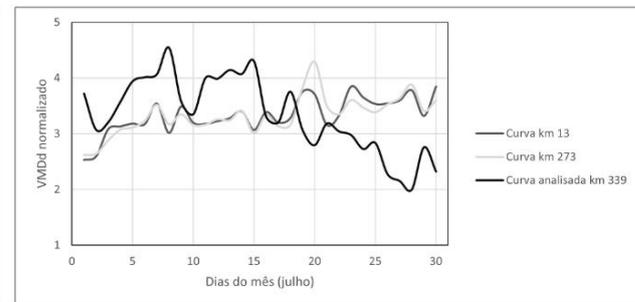
(c) Análise das curvas normalizadas para o sentido crescente para o posto do km 154



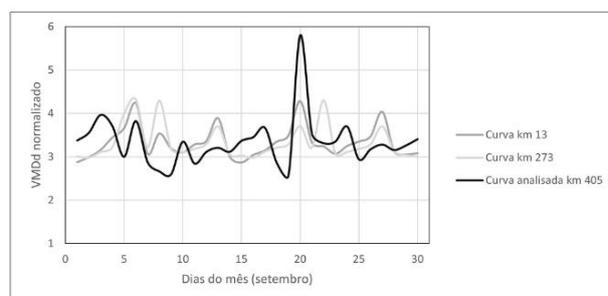
(d) Análise das curvas normalizadas para o sentido decrescente para o posto do km 154



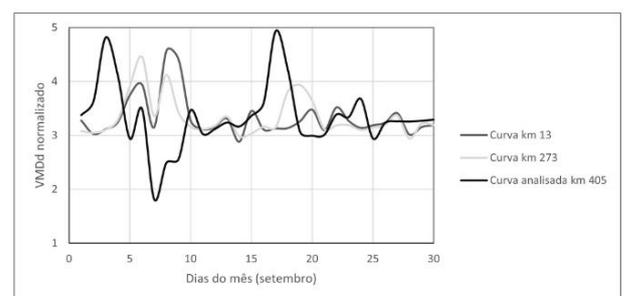
(e) Análise das curvas normalizadas para o sentido crescente para o posto do km 339



(f) Análise das curvas normalizadas para o sentido decrescente para o posto do km 339



(g) Análise das curvas normalizadas para o sentido crescente para o posto do km 405



(h) Análise das curvas normalizadas para o sentido decrescente para o posto do km 405

5.4.1 Casos onde não foi possível estabelecer relacionamento

Utilizando o método desse trabalho, não foi possível estabelecer semelhança entre os postos de referência e os de curta duração para 3 sentidos de análise. No entanto, existem outras formas de estabelecer essa semelhança.

Uma possibilidade seria definir um raio a partir dos postos de contagem para os quais não foi possível estabelecer semelhança e verificar no sistema do PNCT se há outros postos de contagem contidos dentro desse raio. Partindo dessa premissa, caso fosse verificada a existência de postos dentro desse raio, esses postos passariam por uma verificação de completude e, caso a completude anual fosse verificada, o processo de verificação de semelhança adotado neste trabalho poderia ser aplicado. Isso não garante, no entanto, que os valores de distância euclidiana encontrados ficariam abaixo do limite de 3,0.

Outra possibilidade é definida por FHWA (2016), baseada no conceito de classificação funcional e/ou utilizando dados geográficos a respeito do uso do solo, como, por exemplo, o grau de urbanização. Dessa forma, é verificado se os postos se situam em locais com características físicas semelhantes, utilizando, por exemplo, tipo de relevo e atividades socioeconômicas atendidas pelas rodovias.

5.5 Resultado dos cálculos do fator K, FHP, expansão volumétrica e proporção de veículos pesados

Cálculo do fator K e do PHF para os postos de referência Os resultados obtidos para os cálculos de fator K e do FHP para os postos de referência, por sentido, bem como o respectivo VMDa podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16: Valores obtidos para o fator K e para o FHP nos postos de referência

Posto	Sentido	VMDa	VH ₅₀	Fator K	FHP
km 13	C	16278	1662	0,1021	0,899
km 13	D	16155	1576	0,0975	0,975
km 273	C	18284	1747	0,0955	0,968
km 273	D	18414	1785	0,0969	0,916

Expansão volumétrica para postos de curta duração Os valores de fator de expansão mensal obtidos nos postos de referência, por sentido, são apresentados na Tabela 17. Nas Tabelas, PR significa posto de referência.

Tabela 17: Valores obtidos para o fator de expansão mensal f_m nos postos de referência, por sentido

Mês	Sentido	f_m do PR km 13	f_m do PR km 273
1	C	0,7787	0,8349
	D	0,7936	0,7545
2	C	0,8379	0,9884
	D	0,8350	0,9942
3	C	0,9888	0,9729
	D	1,0426	0,9229
4	C	1,0082	1,0337
	D	1,0775	1,0421
5	C	1,1676	1,1038
	D	1,1742	1,1157
6	C	1,1602	1,1159
	D	1,1437	1,1139
7	C	1,0411	1,0101
	D	0,9944	1,0287
8	C	1,1259	1,0508
	D	1,1283	1,0874
9	C	1,0963	1,0516
	D	1,0561	1,0349
10	C	1,0957	1,0400
	D	1,0938	1,0361
11	C	1,0147	1,0063
	D	1,0373	0,9831
12	C	0,8679	0,8771
	D	0,8184	0,9323

Após a aplicação dos respectivos valores de expansão mensal para os meses dos postos de curta duração onde foi verificada completude mensal de dados, o VMDa foi calculado por meio da Equação 13. Os valores para o VHP de cada posto de curta duração são calculados com a aplicação do fator K respectivo de cada posto de referência ao VMDa expandido. Os valores calculados para o VMDa e para o VHP podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 18: Valores de VMDa e VHP calculados para os postos de curta duração

Posto	Sentido	VMDa	VHP
km 103	C	23315	2227
km 103	D	22419	2188
km 154	C	22553	2154
km 154	D	24012	2327
km 339	C	16556	1581

Cálculo da proporção de veículos pesados Os resultados obtidos para o cálculo de Pt para cada posto podem ser observados na Tabela 19, onde “Ref.” indica que o posto é de referência, e “CD” indica que é de curta duração.

Tabela 19: Valores de Pt calculados para os postos de contagem

Identificação do posto		Sentido	Pt (%)
km 13	Ref.	C	23,32
		D	24,41
km 103	CD	C	26,06
		D	22,65
km 154	CD	C	17,73
		D	21,61
km 273	Ref.	C	34,48
		D	36,96
km 339	CD	C	13,52

5.6 Definição dos dados geométricos da via

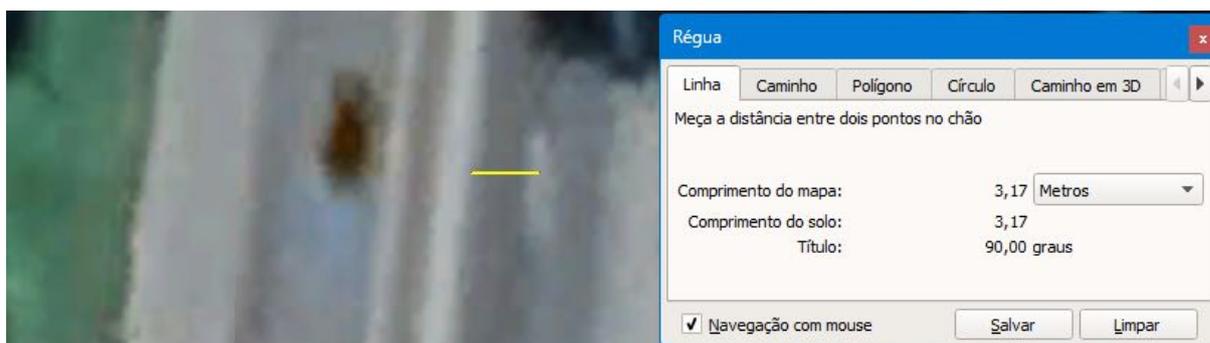
Nesta seção, serão apresentados os dados geométricos e a velocidade regulamentar da via para o cálculo do nível de serviço pelo método do HCM.

5.6.1 Levantamento de dados

Desobstrução lateral total e largura de faixa A desobstrução lateral direita (LC_R) e esquerda (LC_L) foram observadas no *software Google Earth Pro*. A resolução espacial das imagens faz com que a medida seja grosseira. Para todos os segmentos, a medida da largura de faixa foi de aproximadamente 3,2 metros. O valor convertido para pés é de aproximadamente 10,6 pés. Para a desobstrução lateral esquerda, em segmentos onde há divisão por barreiras do tipo *new jersey* de concreto, foi observada uma distância de aproximadamente 0,8 metros, que corresponde a 2,6 pés. No segmento 5, onde a divisão é por canteiro central, a desobstrução lateral esquerda é maior do que

1,8 metros, portanto, é utilizado o valor de 6 pés nos cálculos do HCM. Para a desobstrução lateral direita, em todos os segmentos, é observada uma distância maior de 1,8 metros entre a rodovia e a obstrução periódica contínua mais próxima. A Figura 20 mostra a largura de faixa do segmento 1 observada no *software*.

Figura 20: Largura de faixa no segmento 1 observada no *Google Earth Pro*



Fonte: Imagens de satélite do Google

Tipo de divisão Ao utilizar a função “*Street View*” do *Google Earth Pro* sobre os segmentos analisados, foi observado que em todos eles havia uma divisão central física, durante todo o comprimento. A Figura 21 mostra um exemplo da divisão encontrada em cada segmento.

Figura 21: Tipo de divisão dos segmentos homogêneos



(a) Segmento dividido, km 13



(b) Segmento dividido, km 103



(c) Segmento dividido, km 154



(d) Segmento dividido, km 273



(e) Segmento dividido, km 339

Fonte: Imagens de satélite do Google

5.6.2 Determinação da velocidade de fluxo livre

Tipo de terreno e velocidade básica de fluxo livre O tipo de terreno e o valor de velocidade regulamentar foram retirados na base de dados pública do PNCT apresentada na Seção 3. Para o valor de *BFFS*, foi adicionado o valor de 5 *mi/h* para todas as velocidades. O resultado é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20: Tipo de terreno e *BFFS*, em *mi/h*, para cada segmento

Segmento	Tipo de terreno	Velocidade (<i>km/h</i>)	Velocidade (<i>mi/h</i>)	<i>BFFS</i> (<i>mi/h</i>)
1	Ondulado	100	57,14	62,14
2	Ondulado	100	57,14	62,14
3	Ondulado	100	57,14	62,14
4	Plano	110	63,35	68,35
5	Ondulado	100	57,14	62,14

Fonte: Adaptado de DNIT (2022)

Cálculo da densidade de pontos de acesso Os pontos de acesso foram identificados em imagens de satélite com auxílio do *Google Earth Pro*. Cada ponto foi marcado como ponto de acesso “C” ou “D”, representando pontos de acesso ao sentido crescente e decrescente do fluxo de tráfego, respectivamente. Na Figura 22, são mostrados os pontos de acesso identificados no segmento do posto de contagem do km 13. Também é mostrado um exemplo de ponto de acesso no sentido decrescente do fluxo de tráfego. Os valores numéricos de pontos de acesso e a densidade de pontos de acesso por milha de cada segmento são apresentados na Tabela 21.

Figura 22: Pontos de acesso encontrados no segmento 1, do posto de contagem do do km 13, e exemplo de um ponto de acesso



Fonte: Imagens de satélite do Google

Tabela 21: Valores utilizados no cálculo e densidade de pontos de acesso para os segmentos

Segmento	Sentido	Pontos de acesso	Extensão (mi)	Densidade (pontos/mi)
1	C	6	13,05	0,45
	D	7		0,53
2	C	9	10,63	0,84
	D	7		0,94
3	C	10	13,67	1,02
	D	14		0,87
4	C	17	16,16	1,05
	D	25		1,54
5	C	14	12,61	1,11

5.7 Cálculo do nível de serviço

A Tabela 22 mostra os valores inseridos no HCM-CALC para o cálculo do LOS para cada segmento e sentido. A porcentagem de veículos pesados (Pt) foi inserida na opção de SUTs, deixando a opção de TTs com o valor 0. A opção escolhida para inserir a porcentagem de veículos pesados no tráfego não influencia o resultado final, uma vez que o terreno é sempre genérico. Os valores apresentados na tabela para a BFFS, para a largura de faixa, para as desobstruções laterais esquerda e direita e para a densidade de pontos de acesso foram arredondados automaticamente pelo *software*. Para todos os segmentos, o número de faixas é 2, e o tipo de mediana é "Dividido".

A Figura 23 mostra o resultado do cálculo do nível do serviço (LOS) para o sentido crescente do segmento 5. O resultado para todos os segmentos analisados é apresentado na Figura 24 e na Tabela 23.

Figura 23: Cálculo do LOS no HCM-CALC para o sentido crescente do segmento 1

The screenshot displays the HCM-CALC software interface for calculating Level of Service (LOS). The window title is "HCM-CALC: Multilane Highway Segment - [Level of Service]" and it is using the "HCM Edition: 6th (2016)".

Input Parameters:

- Number of Lanes: 2
- Demand (veh/h): 1662
- Peak Hour Factor: 0.899
- Heavy Vehicle Factor:
 - Terrain: General
 - General Terrain: Rolling
 - Specific Grade: Length (mi) = 0.0000, Grade (%) = 0.00
 - % Single Unit Trucks (SUTs): 23.3
 - % Tractor Trailers (TTs): 0.0
 - Truck PCE (E,T): 3.00
 - f_HV: 0.682
- Free-Flow Speed (FFS):
 - Method: Estimated
 - Value: 70 mi/h
- FFS Adjustment Factors:
 - Lane Width (ft): 11.0
 - Median Type: Divided
 - Lateral Clearance (ft): Left = 3.0, Right = 6.0, Total = 9.0
 - Access Point Density (access points/mi): 0.5
 - BFFS (mi/h): 62
 - f_LW (mi/h): 1.9
 - f_M (mi/h): 0.0
 - f_TLC (mi/h): 0.7
 - f_A (mi/h): 0.1
 - FFS, calculated (mi/h): 59.4

Results:

- Analysis Flow Rate (pc/h/ln): 1355
- Adjusted Capacity (pc/h/ln): 2187
- v/c: 0.62
- Avg. Speed (mi/h): 59.4
- Density (pc/mi/ln): 22.83
- LOS: C

A diagram in the center shows a "Segment Length" with a "Mainline" arrow pointing right.

Tabela 22: Dados de entrada inseridos no HCM-CALC

Identificação do Posto	Sentido	Demanda (<i>veh/h</i>)	FHP	Tipo de terreno	Pt (%)	<i>BFFS</i> (<i>mi/h</i>)	Pontos de acesso/milha	
km 13	Ref.	C	1662	0,899	Ondulado	23,3	62	0,5
		D	1576	0,975		24,4		0,5
km 103	CD	C	2227	0,968	Ondulado	26,0	62	0,8
		D	2188	0,975		22,6		0,9
km 154	CD	C	2154	0,968	Ondulado	17,7	62	1,0
		D	2327	0,916		21,6		0,9
km 273	Ref.	C	1747	0,968	Plano	34,5	65	1,1
		D	1785	0,916		37,0		1,5
km 339	CD	C	1581	0,968	Ondulado	13,5	62	1,1
Largura de faixa: 11 ft. para todos os segmentos								
Desobstrução lateral direita: 6 ft. para todos os segmentos								
Desobstrução lateral esquerda: 3 ft. para os segmentos 1,2,3 e 4 e 6 ft. para o segmento 5								

Figura 24: Representação gráfica do nível de serviço (LOS) calculado para os segmentos da área de estudo

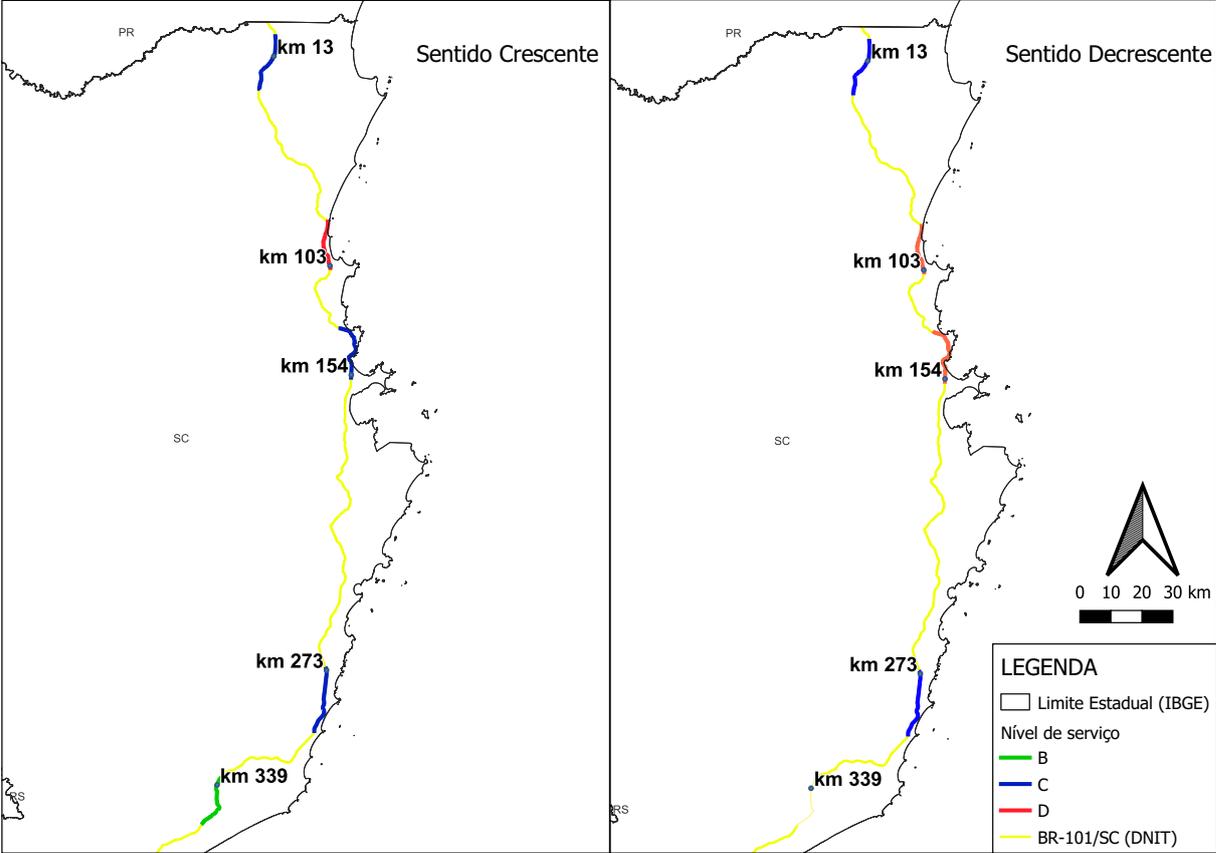


Tabela 23: Resultados do HCM-CALC e LOS calculado por segmento, para cada sentido

Identificação do posto		Segmento	Sentido	Fluxo de tráfego (<i>pc/h/ln</i>)	Capacidade ajustada (<i>pc/h/ln</i>)	v/c	Velocidade média (<i>mi/h</i>)	Densidade (<i>pc/mi/ln</i>)	LOS calculado
km 13	Ref.	1	C	1355	2187	0,62	59,4	22,83	C
			D	1203	2187	0,55	59,4	20,26	C
km 103	CD	2	C	1748	2185	0,80	55,6	31,47	D
			D	1629	2185	0,75	57,1	28,52	D
km 154	CD	3	C	1506	2183	0,69	58,4	25,81	C
			D	1819	2185	0,83	54,6	33,34	D
km 273	Ref.	4	C	1214	2243	0,54	62,2	19,53	C
			D	1335	2241	0,60	62,1	21,51	C
km 339	CD	5	C	1037	2196	0,47	59,8	17,35	B

6 Conclusões

Esse estudo teve como objetivo realizar uma análise operacional de segmentos da BR-101 em SC para os quais existem dados disponíveis no endereço eletrônico do PNCT, aplicando o método de modelagem de rodovias de múltiplas faixas do HCM 6. Foi calculado o nível de serviço para o sentido crescente em cinco segmentos, e para o sentido decrescente em quatro segmentos.

Os *scripts* elaborados para este trabalho para a verificação da completude mensal e anual e para a obtenção dos dados podem ser utilizados para todos os dados de contagem de tráfego de postos disponíveis no PNCT.

Os dados de contagem disponíveis são representativos de 23,3% da extensão quando se observa a totalidade da rodovia. O cálculo do nível de serviço para toda a sua extensão exigiria outras fontes de dados de volume, como dados coletados em pedágios, por exemplo.

A verificação de relacionamento entre postos foi feita com base em curvas de meses escolhidos arbitrariamente, sem observar em que mês ocorreu o volume da enésima hora no posto de referência. O processo de relacionamento poderia ser baseado em dados mensais do mês onde ocorreu essa hora no posto de referência, sendo implementado também um método mais refinado para a determinação do FHP. Poderia ser calculado o valor médio dos FHP determinados nessa mesma hora de pico, nos mesmos dias da semana, com base nos dados de volume dos postos de curta duração. A mesma lógica poderia ser aplicada ao cálculo do Pt.

Conforme mencionado na Seção 3, a fonte de onde foi obtido o tipo de terreno e a BFFS não descreve como os dados foram determinados. Sem a informação de como eles foram determinados, não é possível verificar sua qualidade. Problemas nesses dados são propagados adiante quando eles são utilizados.

O método de relacionamento entre postos não foi o mais adequado para a quantidade de dados disponível. Como só foram verificados dois postos com completude anual de dados, foram utilizadas somente duas curvas de VMDm para realizar a verificação de relacionamento entre postos de referência e postos de curta duração, com dados de volume do mesmo sentido. Além disso, poderiam ter sido utilizadas as curvas dos dois sentidos para os postos de referência, totalizando quatro curvas. Isso aumentaria a possibilidade de encontrar uma distância euclidiana menor, na comparação entre elas.

O valor limite de 3,0 para a distância euclidiana foi inadequado. As curvas com distâncias euclidianas maiores não eram similares visualmente, e o resultado do relacionamento entre os postos não é verdadeiro. Foi optado por continuar o trabalho com as similaridades verificadas, para a continuidade da aplicação do método. Assim, os resultados de nível de serviço e demanda encontrados não representam a realidade para os postos de curta duração.

Também foi identificado que o procedimento possui limitações ao ser realizado com imagens de satélite gratuitas. As medidas de desobstrução lateral total e a largura de faixa são grosseiras. A obtenção de valores melhores exige imagens aéreas com maior resolução espacial, que usualmente não são gratuitas, ou observações de campo, que podem ser inviáveis e onerosas para algumas rodovias.

O dado de entrada da *BFFS* no *software* HCM-CALC é limitado a 65 mi/h. Isso não seria necessário, pois a limitação do método é dada no valor de *FFS*, e não no de *BFFS*, conforme consta em TRB (2016b). Para o segmento 4, a *BFFS* é de 68,35 mi/h, mas no *software*, foi inserido o valor limite. O resultado para esse segmento fica prejudicado. Uma alternativa seria calcular a *FFS* estimada manualmente por meio das fórmulas, e então verificar se a *FFS* resultante fica abaixo do valor máximo permitido pelo HCM, que é de 70 mi/h. Caso positivo, a *FFS* encontrada pode ser inserida no *software* como medida em campo, já que esse dado de entrada não é limitado a 65 mi/h.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

- Realizar a identificação e fazer a análise de greides específicos. Para isso, é necessária a poligonal tridimensional da rodovia. Nesse estudo, foi utilizado o *shapefile* do SNV, que é bidimensional.
- Estudar os diferentes métodos de verificação de relacionamento entre postos, obtenção de fator K, FHP e cálculo de Pt, verificando quais métodos são mais adequados de acordo com as características específicas de cada análise operacional.

Referências

- Andrade, G. R. de. Distribuição de volumes horários de tráfego e hora de projeto em rodovias. 2016.
- Brasil. *Manual de estudos de tráfego*. [S.l.]: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa., 2006.
- Brasil. Lei nº 12.379 de 6 de janeiro de 2011. 2011.
- CNT. *Anuário CNT do Transporte*. [S.l.]: Confederação Nacional do Transporte, 2022.
- Coelho, A. H.; Rodrigues, A. de S. Automação de um procedimento para processamento de dados de volume de tráfego para uso no HCM. *Revista Transporte y Territorio*, 2021.
- DNIT. Síntese da metodologia para estimativa de volume médio diário anual - VMDa 2021 em toda a malha rodoviária federal pavimentada. 2022.
- DNIT. Guia SNV. 2023.
- FHWA. Traffic Monitoring Guide. 2016.
- FIESC. Br-101 do futuro: proposta para garantir a segurança e a eficiência do eixo litorâneo catarinense. 2020.
- Furlanetto, P. H. J. Determinação de volumes médios diários anuais para a malha rodoviária federal brasileira por meio de ajuste de matriz origem-destino com base em dados do PNCT. 2021.
- Garber, N.; Hoel, L. *Traffic and highway engineering*. [S.l.]: Cengage Learning, 2009. 1230 p. ISBN 9780495082507.
- Gecchele. Data mining methods for traffic monitoring data analysis: A case study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2011.
- Gomes, M. J. T. L. Volume horário de projeto para as rodovias estaduais do Ceará: análise e contribuição. 2004.
- Han, J.; Kamber, M.; Pei, J. *Data Mining Concepts and Techniques, 3rd ed.* [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2012.
- ITE. Traffic Engineering Handbook 7 ed. *Institute of Transportation Engineers*, 2016.
- Oliveira, J. K. S. de. Adaptação do HCM-6 para análise de rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil. 2021.
- Ortúzar, J. de D.; Willumsen, L. G. *Modelling Transport*. [S.l.]: Wiley, 2001. 514 p. ISBN 9780471861102.
- Paula, J. M. P. de. Rede integrada de infraestrutura: atores do sistema nacional de viação segundo a legislação. *IPEA*, 2018.
- Pignataro, L. J. *Traffic engineering: theory and practice*. [S.l.: s.n.], 1973.
- Roess, R. P.; Prassas, E. S.; McShane, W. R. *Traffic Engineering*. [S.l.]: Pearson Education International. 3rd edition, 2004.
- Santangelo, T. Análise dos procedimentos ambientais na duplicação da BR-101, trecho divisa PR/SC - entroncamento BR-280. 2003.

- TRB. Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. 6th ed. v. 1:Concepts, 2016.
- TRB. Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. 6th ed. v. 2:Uninterrupted Flow, 2016.
- Vasques, S. A construção da BR-101 e seus reflexos na economia de Joinville. 2002.
- Weijermans; Berkum. Analyzing highway flow patterns using cluster analysis. 2005.
- Yang. Analysis of traffic state variation patterns for urban road network based on spectral clustering. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017.

A Script para verificação de completude mensal e anual de um posto de contagem

```
1 # -*- coding: utf -8 -*-
2
3 #=====
4 #Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
5 #Departamento de Engenharia Civil (ECV)
6 #Trabalho de Conclusão de Curso(TCC)
7 #Aluno: Carlos Eduardo Figur
8 #Orientador: Alexandre Hering Coelho
9 #Script para verificar a completude mensal e anual dos postos de contagem
10 #2023 - 11 - 05
11
12 #=====
13
14 #IMPORTS
15 import requests
16 import calendar
17
18 #VARIÁVEIS
19 comp = 0
20 inc = 0
21 anoinc = 0
22 posto = 426
23 ano = 2017
24
25 #Loop que percorre todos os dias do mês, verifica se cada dia possui dados completos de 15
  → em 15 minutos para todas as horas do dia. Caso algum dia possua dados incompletos, o
  → mês é classificado como incompleto. Caso possua todos os dias com dados completos
  → durante o mês, o mês é classificado como completo.
26 for m in range(12):
27     num_days = calendar.monthrange(ano, m + 1)[1]
28     for d in range(num_days):
29         link = 'http://servicos.dnit.gov.br/dadospnc/api/VolumeQuartoHora/'+str(posto)+
30             '?ano='+str(ano)+'&mes='+str(m+1)+'&dia='+str(d+1)
31         r = requests.get(link)
32         if len(r.json()['dado']) == 192:
33             comp += 1
34         else:
35             inc += 1
36     if inc > 0:
37         print(str(m+1) + ' INCOMPLETO')
38     inc = 0
```

```
39     anoinc += 1
40     else:
41         print(str(m+1) + ' COMPLETO')
42
43
44 #Caso qualquer mês possua dados incompletos, o posto é classificado como incompleto. Do
45 ↪ contrário, é classificado como completo, e pode ser usado como posto de referência.
46 if anoinc > 0:
47     print('POSTO INCOMPLETO')
48 else:
49     print('POSTO COMPLETO')
50
```

B *Script* para agregação dos dados de um ano de um posto de contagem em um único arquivo .csv

```
1 # -*- coding: utf -8 -*-
2
3 #=====
4 #Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
5 #Departamento de Engenharia Civil (ECV)
6 #Trabalho de Conclusão de Curso(TCC)
7 #Aluno: Carlos Eduardo Figur
8 #Orientador: Alexandre Hering Coelho
9 #Script para agregar os dados de um dia completo de um posto de contagem do PNCT em um
  → único arquivo CSV.
10 #2023 - 11 - 05
11
12 #=====
13
14 #IMPORTS
15 import requests
16 import pandas as pd
17 import calendar
18 import os
19
20 #VARIÁVEIS
21 posto = 428
22 ano = 2019
23 output_dir = 'C:\\Users\\kadu_\\Desktop\\TCC\\7.Script_DNIT\\0.Postos\\Posto_' + str(posto)
24 #O diretório deve ser criado previamente no computador. Do contrário, o script retornará um
  → erro informando que o diretório onde o arquivo .csv deveria ser armazenado não existe
25
26 #=====
27 #Criando DataFrame Vazio
28 dffinal = pd.DataFrame()
29
30
31 #Loop que percorre todos os dias do ano, verifica se o dia possui dados completos de 15 em
  → 15 minutos para todas as horas do dia, e, caso positivo, insere todos os dados
  → referentes àquele dia no DataFrame. Para dias completo, as informações são empilhadas e
  → i arquivo final possui todos os dados de dias completos para o posto e o ano
  → especificado nas variáveis
32
33 for m in range(12):
34     num_days = calendar.monthrange(ano, m + 1)[1]
35     for d in range(num_days):
```

```
36     link = 'http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/api/VolumeQuartoHora/'+str(posto)+
37           '?ano='+str(ano)+'&mes='+str(m+1)+'&dia='+str(d+1)
38     r = requests.get(link)
39
40     if len(r.json()['dado']) == 192:
41         df = pd.DataFrame(r.json()['dado'])
42         dffinal = dffinal.append(df)
43
44     #Cria o arquivo .csv dentro do diretório especificado
45     file_name = str(posto) + '_' + str(ano) + '.csv'
46     file_path = os.path.join(output_dir, file_name)
47     dffinal.to_csv(file_path, sep=';', decimal=',')
```
