



**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RODOVIAS DE
MÚLTIPLAS FAIXAS CONSIDERANDO A RELAÇÃO ENTRE
A VELOCIDADE DE FLUXO LIVRE E OS VALORES DE
CAPACIDADE PARA ÁREAS SUBURBANAS E RURAIS**

ANDRÉS FELIPE IDROBO SAMBONI

**TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RODOVIAS DE
MÚLTIPLAS FAIXAS CONSIDERANDO A RELAÇÃO ENTRE
A VELOCIDADE DE FLUXO LIVRE E OS VALORES DE
CAPACIDADE PARA ÁREAS SUBURBANAS E RURAIS**

ANDRÉS FELIPE IDROBO SAMBONI

ORIENTADORA: DSc. MICHELLE ANDRADE

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

PUBLICAÇÃO: T.TD – 002/2020

BRASÍLIA/DF: JUNHO/2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RODOVIAS DE MÚLTIPLAS
FAIXAS CONSIDERANDO A RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE
FLUXO LIVRE E OS VALORES DE CAPACIDADE PARA ÁREAS
SUBURBANAS E RURAIS**

ANDRÉS FELIPE IDROBO SAMBONI

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM TRANSPORTES.**

APROVADA POR:

Prof^a. Michelle Andrade, Dr^a, (UnB)
(Orientadora)

Prof. Alan Ricardo da Silva, Dr, (UnB)
(Examinador interno)

Prof. José Reynaldo Anselmo Setti, Dr, (USP)
(Examinador externo)

Prof^a. Mónica Soares Velloso, Dr^a, (UniCEUB)
(Examinadora externa)

BRASÍLIA/DF, 23 de JUNHO de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Henrique Araújo - Bibliotecário Documentalista - CRB N° 3233)

S187a SAMBONI, ANDRÉS FELIPE IDROBO

Análise de desempenho de rodovias de múltiplas faixas considerando a relação entre a velocidade de fluxo livre e os valores de capacidade para áreas suburbanas e rurais. [Distrito Federal] 2020.

xxiii, 191 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Transportes, 2020).
Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. HCM	2. Rodovia de Pista dupla
3. Simuladores de Tráfego	4. Algoritmos genéticos (AG)
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)
	CDU: 656.13.056.4

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SAMBONI, A. F. I. (2020) *Análise de desempenho de rodovias de múltiplas faixas considerando a relação entre a velocidade de fluxo livre e os valores de capacidade para áreas suburbanas e rurais*. Publicação T.TD-002/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 191 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Andrés Felipe Idrobo Samboni

TÍTULO: Análise de desempenho de rodovias de múltiplas faixas considerando a relação entre a velocidade de fluxo livre e os valores de capacidade para áreas suburbanas e rurais.

GRAU: Doutor ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Andrés Felipe Idrobo Samboni

Programa de Pós-Graduação em Transportes. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Anexo SG12, 1o andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Universidade de Brasília, Brasília, DF. CEP: 70910-900
andresidro@gmail.com

EPÍGRAFE

*“Se quer viver uma vida feliz,
Amarre-se a uma meta,
Não a pessoas nem as coisas”*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelas oportunidades e perseverança concedida para que eu pudesse culminar esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Cielo e Simon, pela confiança e suporte incondicional, por acreditaram em mim e por se sacrificarem em prol dos investimentos para minha educação. Aos meus irmãos, Daniel e Juan Jose, que de alguma forma se fizeram presentes diminuindo a saudade provocada pela distância. As minhas avós Evelia e Lola por estarem presentes e me servirem de exemplo para seguir adiante.

À professora Michelle Andrade, meu agradecimento pelo tempo, conselhos e ensinamentos concedidos para atingir os objetivos do trabalho. Ao professor Paulo Cesar pelo apoio e ensinamentos transmitidos, além de brindar-me sua confiança para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço aos demais membros titulares de banca, professores Alan Ricardo da Silva, José Reynaldo Anselmo Setti e Mônica Soares Velloso, por terem aceitado participar da avaliação e pelas excelentes contribuições dadas.

Aos professores, servidores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Transportes da Universidade de Brasília – PPGT/UnB e funcionários de outras instituições como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT, que contribuíram de uma ou outra forma, com minha formação ao longo dos anos de mestrado e doutorado.

Ao PTV Brasil pelo suporte no fornecimento do programa VISSIM, especialmente ao senhor Alejandro Atúnez de Mayolo.

À equipe de pessoas que me ajudaram a fazer o estudo de campo e a implementação de sistemas de programação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE RODOVIAS DE MÚLTIPLAS FAIXAS CONSIDERANDO A RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE FLUXO LIVRE E OS VALORES DE CAPACIDADE PARA ÁREAS SUBURBANAS E RURAIS.

As metodologias apresentadas pelo *Highway Capacity Manual* (HCM) são as mais utilizadas para o estudo de rodovias pista dupla pela comunidade técnica brasileira. Essas metodologias se fundamentam na determinação e estimativa das velocidades desenvolvidas pela corrente de tráfego num segmento rodoviário, em função de modelos de curvas da relação fluxo-velocidade. O presente estudo buscou desenvolver um procedimento para a determinação de novas curvas de fluxo-velocidade para segmentos rodoviários do Distrito Federal e do estado de Goiás. A partir de informações primárias coletadas em campo por meio de veículo teste com aparelho GPS e do emprego de equipes de filmagem, foram obtidos dados de contagem de tráfego e velocidades médias de viagem em doze segmentos rodoviários. Foram desenvolvidos modelos de simulação de tráfego empregando o *software* Vissim, os quais foram calibrados com os dados de campo empregando algoritmos genéticos. Assim foi possível determinar novas relações entre o fluxo de tráfego e a velocidade para rodovias de pista dupla no Distrito Federal e seu entorno. Os resultados obtidos indicam que os modelos desenvolvidos podem substituir os utilizados pelo HCM nas análises da qualidade do serviço para essas rodovias, e que o procedimento empregado pode ser replicado para outras localidades.

Palavras-chave: Simuladores de Tráfego, Algoritmos Genéticos, rodovias de pista dupla, HCM, análise operacional.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTIPLE TRACK HIGHWAYS CONSIDERING THE RELATIONSHIP BETWEEN FREE FLOW SPEED AND CAPACITY VALUES FOR SUBURBAN AND RURAL AREAS

The methodologies presented by the Highway Capacity Manual (HCM) are the most commonly used by the Brazilian technical community for the study of multilane highways. These methodologies are based on the determination and estimation of the speeds developed by the traffic flow in a road segment, according to models of speed-flow curves. This research sought to develop a procedure for determining new speed-flow curves for road segments in Brazil's Federal District and the state of Goiás. Traffic count data and average travel speeds were obtained in twelve road segments through primary information collected in the field using test vehicles with GPS devices and video crews. Traffic simulation models were developed using the software Vissim, and genetic algorithms were used with the field data for calibration. New curves between traffic flow and speed were obtained for multilane highways in Brazil's Federal District and its surroundings. The results indicated that the proposed models can replace those used by HCM in service quality analyses in this type of highways, and that the procedure can be used reapplied in other locations.

Keywords: Traffic Simulators, Genetic Algorithms, multilane highways, HCM, operational analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 PROBLEMA DA PESQUISA	3
1.3 HIPÓTESE	6
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 Objetivo Geral	6
1.4.2 Objetivos Específicos:	6
1.5 JUSTIFICATIVA	7
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	8
2. MANUAL HCM	11
2.1 ESTUDOS RELACIONADOS COM A ADEQUAÇÃO DO HCM	11
2.2 DIFERENÇAS ENTRE OS MANUAIS HCM 2010 E HCM 6ª EDIÇÃO	16
2.3 CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE MÚLTIPLAS FAIXAS	20
2.3.1 Capacidade em rodovias de múltiplas faixas	20
2.3.2 Nível de serviço em rodovias de múltiplas faixas	22
2.4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE ANÁLISES DE RODOVIAS DE MÚLTIPLAS FAIXAS	23
2.4.1 Limitações da Metodologia	27
2.5 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE FLUXO LIVRE (<i>FFS</i>)	27
2.5.1 Ajuste da largura de faixa	28
2.5.2 Ajuste para desobstrução lateral	29
2.5.3 Ajuste para o tipo de divisão dos fluxos opostos	30
2.5.4 Ajuste para densidade de pontos de acesso	30
2.6 AJUSTE DA CAPACIDADE	31
2.7 AJUSTE DO VOLUME DE DEMANDA	31
2.7.1 Ajuste de veículos pesados	32

2.8	ESTIMATIVA DA VELOCIDADE E DA DENSIDADE	33
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
3	CARACTERIZAÇÃO E COLETA DE INFORMAÇÃO EM TRECHOS RODOVIÁRIOS DE MÚLTIPLAS FAIXAS.....	36
3.1	RODOVIAS DE ESTUDO	37
3.1.1	Rodovia BR-020	39
3.1.2	Rodovia BR-040	39
3.1.3	Rodovia BR-060	40
3.1.4	Rodovia BR-070	41
3.2	ESTUDOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO DE TRÁFEGO	41
3.2.1	Levantamento de dados geométrico com <i>GPS</i>	43
3.2.2	Pesquisa de velocidade com veículo teste	43
3.2.3	Dados de tráfego por meio de filmadoras.....	45
3.2.4	Dados de tráfego existentes	47
3.3	SEGMENTOS DE ESTUDO	48
3.3.1	Critérios de seleção.....	48
3.4	ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS.....	49
3.4.1	Rodovia BR-020, Segmentos 1 a 4.....	55
3.4.2	Rodovia BR-040, Segmentos 5 e 6.....	56
3.4.3	Rodovia BR-060, Segmentos 7 a 10.....	58
3.4.4	Rodovia BR-070, Segmentos 11 e 12.....	59
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
4	MODELO DE SIMULAÇÃO	63
4.1	SIMULADORES DE TRÁFEGO	63
4.2	ESCOLHA DO SIMULADOR	64
4.3	SOFTWARE VISSIM.....	66
4.4	MODELOS COMPORTAMENTAIS DO VISSIM.....	69

4.4.1	Parâmetros do algoritmo de seguimento “ <i>car-following</i> ”	70
4.4.2	Parâmetros do algoritmo de mudança de faixa “ <i>lane-change</i> ”	73
4.4.3	Lógica de desempenho veicular	79
4.4.4	Dados de saída do Vissim.....	81
4.5	PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	82
4.5.1	Primeira etapa de calibração.....	84
4.5.2	Adaptações do modelo Vissim as condições do Brasil	91
4.5.3	Segunda etapa de Calibração	94
4.5.4	Função <i>fitness</i>	98
4.5.5	Etapa de Validação	102
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE DESEMPENHO DO VISSIM	
	104	
5.1	ALGORITMO GENÉTICO USADO NA CALIBRAÇÃO DO VISSIM	108
5.2	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO	113
5.3	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO VISSIM	118
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
6	MODELO DE RELAÇÃO DE FLUXO E VELOCIDADE.....	123
6.1	DADOS DE TRÁFEGO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE VELOCIDADE.....	123
6.1.1	Filtros para a determinação do volume diário médio anual.....	125
6.2	ESTIMATIVAS DO MODELO VISSIM PARA A DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES DE TRÁFEGO DE FLUXO LIVRE	128
6.2.2	Relação entre o ponto de transição e a velocidade de fluxo livre.....	133
6.3	ESTIMATIVAS DO MODELO VISSIM PARA DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES DE TRÁFEGO NO INÍCIO DO CONGESTIONAMENTO	135
6.3.1	Regiões não congestionadas e determinação da densidade na capacidade ..	136
6.3.2	Limites do modelo convexo para relação fluxo-velocidade proposto	140

6.4 ADEQUAÇÃO DO MODELO DE FLUXO VELOCIDADE PARA RODOVIAS EM SEGMENTOS RURAIS E SUBURBANOS	142
6.4.1 Relação fluxo-velocidade de rodovias brasileiras	147
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	150
7.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	150
7.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	152
7.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
APÊNDICE A – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO..	163
APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DAS VELOCIDADES DESEJADAS APÓS A CALIBRAÇÃO PARA OS SEGMENTOS ESTUDADOS	169
APÊNDICE C – VOLUME DE TRÁFEGO	185
APÊNDICE D – RELAÇÕES FLUXO-VELOCIDADE OBTIDAS POR SIMULAÇÃO	
189	

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fator de ajuste para largura da faixa	29
Tabela 2.2 – Redução de FFS por desobstrução lateral da faixa.....	29
Tabela 2.3 – Fator de ajuste por tipo de divisão dos fluxos opostos.....	30
Tabela 2.4 – Fator de ajuste para densidade de pontos de acesso	30
Tabela 2.5 – Valores de <i>ET</i> por tipo de terreno	33
Tabela 2.6 – Determinação do nível de serviço para rodovias de múltiplas faixas	34
Tabela 3.1 – Segmentos selecionados para o Estudo	50
Tabela 3.2 – Período de coleta de dados	51
Tabela 4.1 – Categorias de veículos do Vissim	79
Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros dos simulados	86
Tabela 4.3 – Valores dos testes de normalidade para o Segmento 1 – Fluxo e tempo médio de viagem	87
Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância – Segmento 1	88
Tabela 4.5 – Resultados teste paramétrico <i>ANOVA</i> – Segmento 1	88
Tabela 4.6 – Resultados teste não paramétricos Kruskal-Wallis – Segmento 1	88
Tabela 4.7 – Resultados da análise de sensibilidade dos paramétricos.....	91
Tabela 4.8 – Características das quatro classes de caminhões	92
Tabela 5.1 – Erros médios absolutos e valores de fitness obtidos a partir do <i>AG</i> para o conjunto de dados de calibração e validação	113
Tabela 5.2 – Comparação de fluxos veiculares entre os valores observados e os valores simulados.....	114
Tabela 5.3 – Resultado da calibração das curvas de velocidade desejadas.....	115
Tabela 5.4 – Comparação entre os erros médios absolutos obtidos a partir do <i>AG</i> para os conjunto de dados da calibração e da validação.....	118
Tabela 5.5 – Diferença entre valores simulados e observados do tempo médio de viagem, na fase de validação do Vissim	119
Tabela 5.6 – Velocidade desejada de cada categoria de veículos no segmento 1	120
Tabela 6.1 – Equipamentos de coleta utilizados	124
Tabela 6.2 – Valores de ponto de transição (<i>BP</i>) nos locais estudados	133
Tabela 6.3 – Análise de <i>cluster</i> para o segmento 1	139

Tabela 6.4 – Capacidade, velocidade na capacidade e densidade na capacidade de cada segmento.....	140
Tabela 6.5 – Limites das curvas fluxo-velocidade.....	141
Tabela 6.6 – Comparação de velocidades de fluxo livre (<i>FFS</i>).....	147
Tabela 6.7 – Comparação de pontos de transição (<i>BP</i>).....	148
Tabela 6.8 – Comparação de velocidades na capacidade (<i>CS</i>).....	148
Tabela 6.9 – Comparação de capacidade (<i>C</i>).....	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Metodologia do HCM 6ª Edição para estimação do nível de serviço (<i>NS</i>) de rodovias de múltiplas faixas.....	4
Figura 1.2 – Curvas fluxo-velocidade do HCM 6ª Edição para rodovias de múltiplas faixas...	5
Figura 1.3 – Metodologia e estrutura da Tese	10
Figura 2.1 – Estudos realizados para a elaboração do HCM 2010	14
Figura 2.2 – Curvas de velocidade-fluxo para: a) vias expressas	18
Figura 2.3 – Curvas de velocidade-fluxo para: b) rodovias de múltiplas faixas do HCM 6ª Edição.....	18
Figura 2.4 – Rodovias de múltiplas faixas; a) suburbana dividida	23
Figura 2.5 – Rodovias de múltiplas faixas; b) suburbana não dividida	24
Figura 2.6 – Rodovias de múltiplas faixas; c) suburbana com conversão a esquerda (TWLTL)	24
Figura 2.7 – Rodovias de múltiplas faixas; d) rural não dividida	24
Figura 2.8 – Elementos de Análise em trechos de rodovias de múltiplas faixas	25
Figura 2.9 – Elementos de Análise de segmentos em rodovias de múltiplas faixas	25
Figura 2.10 – Metodologia para rodovias de múltiplas faixas	26
Figura 3.1 – Mapa de vias arteriais no Distrito Federal e no Estado de Goiás: BR-020, BR-040, BR-060 e BR-070.....	38
Figura 3.2 – Rodovia BR-020	39
Figura 3.3 – Rodovia BR-040	40
Figura 3.4 – Rodovia BR-060	40
Figura 3.5 – Rodovia BR-070	41
Figura 3.6 – Fluxograma para a caracterização do fluxo de tráfego	42
Figura 3.7 – Equipamento utilizado: (a) veículo teste; (b) Câmeras de filmagens e rastreador (<i>GPS</i>).....	44
Figura 3.8 – Perfil de velocidade BR-020/DF/GO.....	44
Figura 3.9 – Esquema de posicionamento das câmeras filmadoras e dos pesquisadores durante a coleta de dados	45
Figura 3.10 – Equipamento utilizado: (a) Câmeras de filmagens e (b) <i>Palme</i>	46
Figura 3.11 – Taxas de fluxo de tráfego coletados nos 12 segmentos de estudo.....	51

Figura 3.12 – Velocidades de viagem coletadas nos 12 segmentos pelo método do veículo teste	52
Figura 3.13 – Velocidades de viagem coletadas nos 12 segmentos pelo método das placas... 52	52
Figura 3.14 – Taxas de fluxo nos segmentos suburbanos e rurais	53
Figura 3.15 – Velocidades dos veículos nos segmentos suburbanos e rurais	54
Figura 3.16 – Relação das velocidades dos veículos com o fluxo de tráfego	54
Figura 3.17 – Localização dos segmentos da BR-020: (a) segmento 1 e 2, (b) segmento 3 e 4	55
Figura 3.18 – Composição do tráfego na BR-020.....	55
Figura 3.19 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-020.....	56
Figura 3.20 – Localização dos segmentos da BR-040, segmentos 5 e 6.....	56
Figura 3.21 – Composição do tráfego na BR-040.....	57
Figura 3.22 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-040.....	57
Figura 3.23 – Localização dos segmentos da BR-060: (a) segmento 7 e 8, (b) segmento 9 e 10.....	58
Figura 3.24 – Composição do tráfego na BR-060.....	59
Figura 3.25 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-060.....	59
Figura 3.26 – Localização dos segmentos da BR-070, segmentos 11 e 12.....	60
Figura 3.27 – Composição do tráfego na BR-070.....	60
Figura 3.28 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-070.....	61
Figura 4.1 – Lógica de seguimento de veículo (<i>car-following</i>)	67
Figura 4.2 – Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i> do Vissim	71
Figura 4.3 – Parâmetros do algoritmo de mudança de faixa do Vissim – <i>lane change behavior</i>	73
Figura 4.4 – Parâmetros do algoritmo de mudança de faixa do Vissim – <i>lateral behavior</i>	75
Figura 4.5 – Distribuição de velocidade desejada.....	80
Figura 4.6 – Valores <i>default</i> das curvas de aceleração para as categorias de veículos no Vissim	80
Figura 4.7 – Relatório <i>MER</i>	82
Figura 4.8 – Relatório <i>RSR</i>	82
Figura 4.9 – Procedimento para o modelo de simulação microscópica Calibração e Validação	84
Figura 4.10 – Variação da velocidade média de viagem em função da variação do CC1	90
Figura 4.11 – Variação do tempo médio de viagem em função da variação do CC1	90

Figura 4.12 – Configuração para as funções de: a) aceleração máxima e b) de aceleração desejada dos caminhões	93
Figura 4.13 – Fluxograma da estrutura do Algoritmo Genético utilizado	96
Figura 5.1 – Altimetria e características geométricas	104
Figura 5.2 – Classes de veículos consideradas dentro do modelo: a) <i>VCI</i> , b) <i>VC2</i> , c) Ônibus e d) Autos	105
Figura 5.3 – Distribuições de velocidade empíricas (desejadas) e observadas por classe de veículo – segmento 1	106
Figura 5.4 – Distribuição de volume por intervalo de tempo de 5 minutos.....	107
Figura 5.5 – <i>Links</i> de entrada para acesso de veículos no segmento de simulação	107
Figura 5.6 – <i>Layout</i> de pontos de coleta de dados	108
Figura 5.7 – Variação do valor da função fitness do indivíduo mais bem adaptado em função do número de gerações do <i>AG</i> , para uma população de 30 indivíduos.....	110
Figura 5.8 – Variação do valor da função fitness do <i>AG</i> em função da alteração da a) taxa de mutação e b) taxa de cruzamento, para uma população de 30 indivíduos e 10 gerações	111
Figura 5.9 – Convergência do <i>fitness</i> do segmento 1 usando a Equação (4.6)	112
Figura 5.10 – Distribuição de velocidades de a) carros de passeio e b) caminhões leves para o segmento 1.....	116
Figura 5.11 – Comparação de tempos médios de viagem de a) carros de passeio e b) caminhões leves para o segmento 1, antes e depois da calibração.....	117
Figura 6.1 – Localização dos equipamentos PNCV próximos aos segmentos de estudo	124
Figura 6.2 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 2	126
Figura 6.3 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 3	126
Figura 6.4 – Composição média do tráfego em 2017 nos segmentos rodoviários estudados	127
Figura 6.5 – Volume médio diário anual para cada segmentos	127
Figura 6.6 – Curva de Fluxo-velocidade do segmento 1.....	129
Figura 6.7 – Curva de Fluxo-velocidade do segmento 3.....	129
Figura 6.8 – Média das velocidades dos segmentos rurais	130
Figura 6.9 – Média das velocidades dos segmentos suburbanos	131
Figura 6.10 – Ponto de transição (<i>BP</i>) e desvio padrão das velocidades do segmento 2.....	132
Figura 6.11 – Ponto de transição (<i>BP</i>) e desvio padrão das velocidades do segmento 4.....	132
Figura 6.12 – Linha de tendência de <i>BP</i> com o aumento da velocidade de fluxo livre para segmentos rurais.....	134

Figura 6.13 – Linha de tendência de BP com o aumento da velocidade de fluxo livre para segmentos suburbanos.....	134
Figura 6.14 – Configuração de uma seção rodoviária congestionada.....	136
Figura 6.15 – Análise de <i>cluster</i> para regime não congestionado e congestionado segmento 1	138
Figura 6.16 – Regimes de congestionamento e valores de BP e Dc para segmento 1.....	141
Figura 6.17 – Regimes de congestionamento e valores de BP e Dc para segmento 3.....	141
Figura 6.18 – Forma geral do HCM de representação de uma curva de fluxo-velocidade para autoestradas e rodovias de múltiplas faixas	142
Figura 6.19 – Curva de fluxo-velocidade proposta para segmentos rodoviários rurais.....	144
Figura 6.20 – Curva de fluxo-velocidade proposta para segmentos rodoviários suburbanos	145
Figura 6.21 – Comparação entre o modelo proposto para segmentos rurais e o modelo do HCM 6ª Edição para múltiplas faixas	146
Figura 6.22 – Comparação entre o modelo proposto para segmentos suburbanos e o modelo do HCM 6ª Edição para múltiplas faixas	146

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Segmentos relacionados à segurança viária, intervenções e benefícios.....	26
Quadro 3.1 – Configuração veicular adotada.....	46
Quadro 4.1 – Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>	72
Quadro 4.2 – Parâmetros do algoritmo de <i>lane change behavior</i>	74
Quadro 4.3 – Parâmetros do algoritmo de <i>lateral behavior</i>	76
Quadro 4.4 – Medidas de desempenho	81
Quadro 4.5 – Parâmetros para a construção da rede rodoviária.....	85
Quadro 4.6 – Medidas agregadas para estimativa de erro (<i>MAER</i>)	98

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMEMCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO	Associação Americana de Funcionários das Rodovias e Transportes do Estado (<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>)
ABX	Limite comportamental que controla a taxa de aceleração do veículo
AG	Algoritmos Genéticos
ANOVA	Teste paramétrico de análise de igualdade das médias
ATS	Velocidade Média de Viagem
AX	Limite comportamental que controla a taxa de aceleração do veículo
BFFS	Velocidade de fluxo livre de base
BP	Ponto de Transição
C	Capacidade
CAFs	Fator de ajuste de capacidade
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC1	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC2	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC3	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC4	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC5	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC6	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC7	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC8	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CC9	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CCO	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CCO-CC9	Parâmetros do algoritmo de <i>car-following</i>
CGDESP/DPP/DNIT	Coordenação-Geral de Desenvolvimento e Projetos/ Diretoria de Planejamento e Pesquisa/ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
CGPLAN/DPP/DNIT	Coordenação-Geral de Planejamento e Programação de Investimentos /Diretoria de Planejamento e Pesquisa/ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
CLDV	Limite comportamental que controla a taxa de aceleração do veículo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COM	<i>Microsofts Component Object Model</i>
CORSIM	<i>Software</i> de Simulação microscópico de tráfego
CPU	Unidade Central de Processamento (<i>Central Process Unit</i>)
CREMA	Contratos de Restauração e Manutenção

CS	Velocidade de Capacidade
Dc	Valor da densidade na capacidade
DER/DF	Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EPL	Empresa de Planejamento e Logística
ET	Equivalente em carros de passeio de um veículo pesado no fluxo de tráfego
EUA	Estados Unidos da América
FFS	Velocidade de Fluxo Livre (<i>Free-Flow Speed</i>)
FFSint	Velocidade Média de Fluxo Livre
GO	Estado de Goiás
GPS	Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System)
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
HOT	<i>High-occupancy/toll</i>
HOV	<i>High-occupancy vehicle</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INTEGRATION	Software de Simulação de Tráfego
LC _L	Desobstrução lateral esquerda
LC _R	Desobstrução lateral direita
LOS	<i>Níveis de Serviço</i>
M	Motos
MAER	Medidas Agregadas para a Estimativa de Erros
MAPE	Medidas Agregadas para a Estimativa de Erros
MATLAB	Linguagem de programação apropriada ao desenvolvimento de aplicativos de natureza técnica
MD	<i>Maximum deceleration</i>
MER	Relatório de saída do simulador
MER_1_2	Relatório de saída do simulador no início do segmento
MF	Rodovias de múltiplas faixas
MH	<i>Min.headway</i>
N	Total de categorias veiculares simuladas
NS	Nível de Serviço

O	Ônibus
OPDV	Limite comportamental que controla a taxa de aceleração do veículo
P	Carros de Passeio
PEC	Equivalente de Carros de Passeio (<i>Estimating Passenger Car</i>)
PHP	Fator horário de pico
PNCT	Plano Nacional de Contagem de Tráfego
PNCV	Plano Nacional e Controle Eletrônico de Velocidade
PNT	Pesquisas Nacionais de Tráfego
PTFS	Porcentagem de Tempo viajando em Pelotões
PTV	<i>Planung Transport Verkehr</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório ou Randômico)
RMASPE	Raiz quadrada do erro percentual médio
RS-030	Rodovia brasileira do estado do Rio Grande do Sul também conhecida por Estrada Velha
RSR	Porcentagem do erro relativo de frequência acumulada
RSR_CAR	Porcentagem do erro relativo de frequência acumulada de carros
SAFs	Fator de ajuste de velocidade
SD	<i>Safety distance</i>
SDV	Limite comportamental que controla a taxa de aceleração do veículo
SDX	Limite comportamental que controla a taxa de aceleração do veículo
SUT	<i>Single-unit trucks</i>
SUT/TT	<i>Single-unit trucks / tractor trailers</i>
TLC	Desobstrução lateral total
TPI	Consortio Triunfo Participações e Investimentos
TRARR	<i>Software</i> de Simulação de tráfego
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TT	<i>Tractor trailers</i>
TWLTL	Rodovia suburbana com conversão a esquerda
UMD	Volume Médio Diário
UnB	Universidade de Brasília
USP	Universidade de São Paulo
VC1	Caminhões Leves

VC2	Caminhões Pesados
<i>Vissim</i>	<i>Verkehr In Stadten - SIMmulation</i>
VLT	Veículo Leve sobre trilhos
VMDA	Volumes médios diário anual

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A mobilidade para pessoas e bens, com o objetivo de promover o acesso a serviços básicos e equipamentos sociais, pode ser encarada como uma preocupação recorrente. Tratamentos sistemáticos sobre temas de tráfego, planejamento e regulação do transporte, logística de distribuição das mercadorias, e a construção da infraestrutura viária são aspectos que devem ser analisados com o objetivo de atender este grande desafio.

Entre os fatores de mobilidade, os estudos de tráfego permitem avaliar o funcionamento das rodovias usadas pelos veículos motorizados para o deslocamento dos usuários. Por meio de formulação matemática e realização de experiências práticas, são feitos estudos dos elementos básicos que compõem o trânsito. O nível de serviço é um indicador do desempenho de um sistema viário, além de ser uma medida de qualidade, sendo, portanto, considerada uma ferramenta útil para o planejamento e projeto de uma rodovia.

O primeiro documento a analisar os conceitos de nível de serviço e capacidade em várias formas de transporte é oriundo dos Estados Unidos da América (EUA) e publicado pelo *Transportation Research Board* (TRB), chamado de *Highway Capacity Manual* (HCM). Este documento reúne o conhecimento teórico e a experiência prática em seus procedimentos, tornando-se a principal fonte de referência para especialistas de transporte. O HCM teve sua primeira publicação em 1950, sendo o primeiro documento técnico a tratar os conceitos de capacidade das instalações de transporte. Em 1965, houve uma importante atualização, quando foi introduzido o conceito de nível de serviço, que até hoje serve de base para determinar a adequação das instalações de transporte sob as perspectivas de planejamento, projeto e operação viária. Desde a primeira versão até a atualidade, foram publicadas seis edições com procedimentos melhorados e atualizados. A última edição foi publicada em 2016, sendo conhecida como *HCM 6th edition* (TRB, 2016).

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) nas coordenações de planejamento faz uso do HCM para analisar as condições operacionais em rodovias e determinar a necessidade de realização de obras de melhoramento (DNIT, 2006). Apesar de

reconhecido e bastante utilizado em todo o mundo, o HCM muitas vezes é aplicado sem que nenhuma adaptação às condições locais seja realizada, apesar do próprio manual advertir sobre esta possibilidade (TRB, 2010).

Os estudos de Prassas (1999) e Loureiro *et al.* (2004) identificaram que vários procedimentos do HCM apresentam deficiências e limitações. Os autores alertam que as metodologias descritas no manual, não podem ser aplicadas diretamente, dada a variabilidade do comportamento dos motoristas no uso da infraestrutura viária, além das condições climáticas, topográficas e dos próprios veículos por regiões de estudo, que podem ser muito diferentes das condições apresentadas na América do Norte. Outros fatores variáveis são: as características do veículo padrão, a geometria das rodovias, as condições da via, entre outros.

Egami (2006) e Mon-Ma (2008) ressaltaram a necessidade da obtenção de dados mais representativos de condições operacionais, demonstrando que a base de conhecimentos ainda necessitava ser expandida para fornecer subsídios suficientes para o desenvolvimento de um Manual de Capacidade Viária com um método para avaliar as rodovias brasileiras. Neste sentido, foram propostas adaptações do HCM para rodovias no Brasil. A exemplo, Bessa Jr. (2009) tratou da determinação da qualidade do serviço fazendo uso de medidas de desempenho obtidas diretamente da observação da corrente de tráfego coletados por sensores permanentes instalados nas rodovias.

Atualmente, uma das características do Brasil é a ampliação da infraestrutura rodoviária de pista dupla, que possibilitam o tráfego de um maior número de veículos com maior conforto, maior nível de segurança, redução dos custos e dos tempos de viagem. Apesar disso, esse tipo de infraestrutura, ainda não é predominante no país. Segundo as diretrizes do DNER (1999) o volume diário médio de veículos define o número de faixas de tráfego no projeto, desta forma a necessidade de pistas duplicadas está diretamente relacionada ao volume de tráfego. Assim, quando houver indicativos de superação de capacidade ou de saturação das vias, intervenções de ampliação devem ser realizadas a fim de garantir a eficiência nos deslocamentos e a redução dos riscos de acidentes.

O HCM 6ª Edição (TRB, 2016) traz um conjunto de procedimentos para avaliação da qualidade de serviço de segmentos homogêneos de rodovias de múltiplas faixas, com base,

principalmente, na relação de fluxo-velocidade da corrente de tráfego. Assim, a temática em questão pretende fazer uma análise dessa metodologia, considerando suas deficiências para avaliar a qualidade de serviço na realidade das rodovias brasileiras e propor melhorias de adaptação.

1.2 PROBLEMA DA PESQUISA

No Brasil, o estudo da capacidade e do nível de serviço em rodovias é feito de acordo com o método proposto pelo manual americano de capacidade viária, o HCM (TRB, 2016). Entre as metodologias propostas no manual, há uma específica para a análise de fluxo não interrompido de vias expressas (*Freeway*) e de rodovias de múltiplas faixas (*Multilane Highways*). Esse procedimento é descrito no Capítulo 12 do manual, que é intitulado *Basic Freeway and Multilane Highway Segments*. Vale destacar que apesar do HCM considerar neste capítulo o “automóvel” e a “bicicleta” como modos de transporte para o método, o presente estudo está restrito ao “automóvel”.

Segundo o HCM (TRB, 2016), as rodovias de múltiplas faixas são definidas como rodovias de duas a três faixas por sentido, onde o fluxo de tráfego é ininterrupto, e quando o espaçamento entre interseções semaforizadas é maior ou igual a 3,22 quilômetros (2 milhas). Os volumes de tráfego são variáveis podendo apresentar demanda entre 15.000 e 40.000 veículos por dia.

A metodologia apresentada pelo HCM 6ª Edição (TBR, 2016) para a determinação do nível de serviço de rodovias de múltiplas faixas considera os seguintes parâmetros: velocidade de fluxo livre, geometria da via, fluxo de tráfego e velocidade média da corrente de tráfego de um segmento ou de uma seção da via analisada. Ele é, portanto, definido com base na relação das curvas fluxo-velocidade, definidas conforme modelos empíricos desenvolvidos a partir de observações coletadas em rodovias dos EUA. Dessa forma, é importante salientar que cada uma das variáveis supracitadas contém parâmetros que necessitam ser calibrados e validados para utilização em outros ambientes, no caso deste estudo, nas rodovias brasileiras.

A Figura 1.1, descreve a metodologia de análise do nível de serviço (*NS*) para rodovias de múltiplas faixas como um conjunto de quatro etapas. A primeira etapa consiste na determinação da velocidade de fluxo livre (*FFS*) seguida da segunda, em que é realizado o ajuste do volume

de demanda de tráfego. Na terceira etapa é realizada a estimativa da velocidade e da densidade do trecho em análise. Por fim, a quarta etapa, é realizada a determinação do nível de serviço com base na densidade, por meio de curvas empíricas fluxo-velocidade, que refletem o desempenho dos veículos e o comportamento dos motoristas em um dado local.

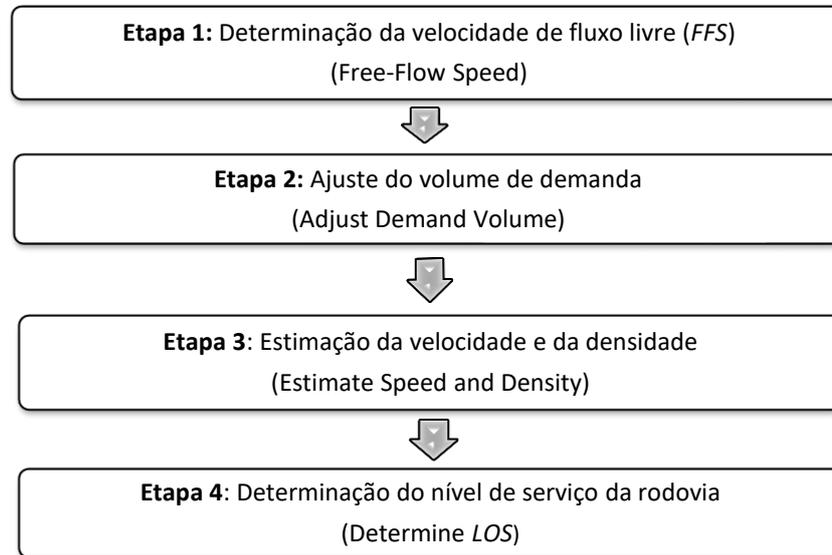


Figura 1.1 – Metodologia do HCM 6ª Edição para estimativa do nível de serviço (*NS*) de rodovias de múltiplas faixas

O modelo para a estimativa da *FFS* apresentado na primeira etapa é aplicado para locais em que a coleta de dados de velocidade de fluxo livre dos segmentos/trechos não é viável, por limitações financeiras ou pela impossibilidade (uma nova via, por exemplo) ou ainda, por outro motivo relevante.

Como não existem informações disponíveis para o estabelecimento de um valor básico para a velocidade de fluxo livre (*BFFS*), o método indica o uso da velocidade de projeto para calcular a *FFS* pela Equação (1.1). Nela são considerando os fatores: características geométricas da via, largura e número de faixas e pontos de acesso.

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{TLC} - f_M - f_A \quad (1.1)$$

Onde:

FFS = velocidade de fluxo livre de um segmento básico (mi/h);

BFFS = *FFS* Básica para o segmento (mi/h);

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

f_{LC} = fator de ajuste para desobstrução lateral total – direita e esquerda (mi/h);

f_M = fator de ajuste para o tipo de divisão dos fluxos opostos (mi/h); e

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

Após estimar a FFS com a Equação (1.1), tem-se o nível de serviço a partir de curvas fluxo-velocidade, que foram calibradas com dados empíricos de uma ampla faixa de velocidades de fluxo livre (Figura 1.2). Como resultado desse processo, na última edição do HCM (TRB, 2016) são apresentadas curvas fluxo-velocidade para rodovias de múltiplas faixas com FFS entre 72 km/h e 113 km/h (45 mi/h e 70 mi/h), representativas de uma variedade de características físicas e operacionais das rodovias.

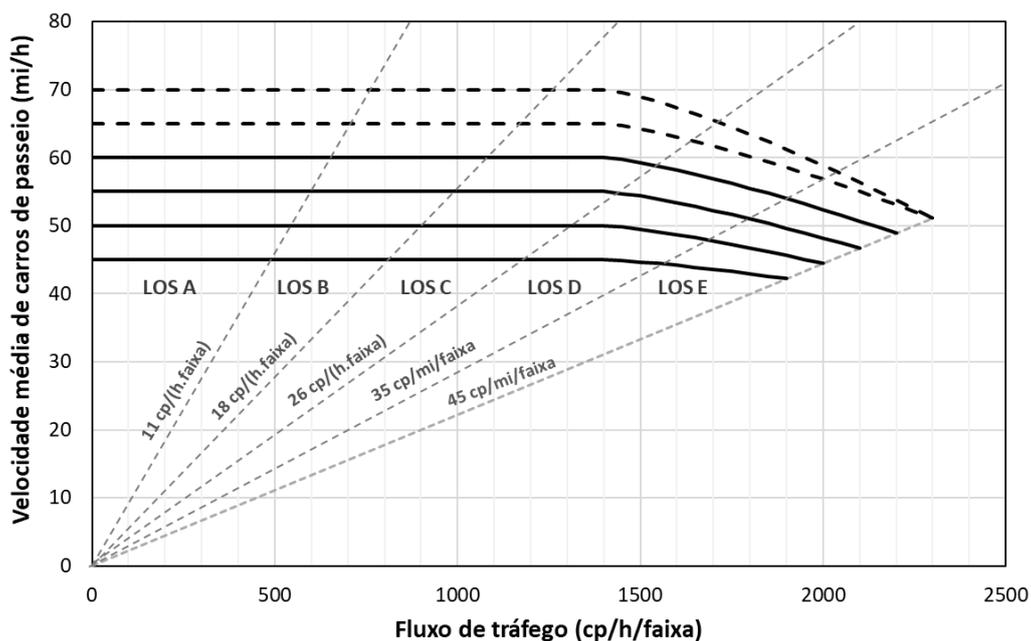


Figura 1.2 – Curvas fluxo-velocidade do HCM 6ª Edição para rodovias de múltiplas faixas
Fonte: adaptação do TRB (2016).

Como as equações da relação fluxo-velocidade do HCM incluem valores definidos para os parâmetros de calibração do modelo com base nos dados empíricos coletados em rodovias distribuídas pelos EUA, o próprio Manual sugere a utilização de valores calibrados localmente em substituição aos *defaults* (ROESS *et al.*, 2010).

Nesse contexto, deseja-se desenvolver um modelo fluxo-velocidade para a análise operacional de rodovias de múltiplas faixas brasileiras, que considere dados empíricos, que contenham observações de fluxo e velocidade desagregadas em áreas suburbanas e áreas rurais e que permitam representar trechos rodoviários com condições variadas.

Assim, a questão norteadora desta pesquisa é “como desenvolver uma adaptação do modelo de fluxo-velocidade utilizado na metodologia do HCM na determinação do nível de serviço de rodovias de múltiplas faixas, que esteja em consonância com as características físicas e operacionais da infraestrutura rodoviária brasileira?”.

1.3 HIPÓTESE

O desenvolvimento desta pesquisa partiu da seguinte premissa: é possível desenvolver uma adaptação do modelo de fluxo-velocidade da metodologia do HCM para avaliar o nível de serviço de rodovias de múltiplas faixas brasileiras por meio de modelagem e simulação realizados a partir de um modelo calibrado com base em dados de campo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é a obtenção de um conjunto de curvas fluxo-velocidade representativo das condições de operação de rodovias de múltiplas faixas da cidade de Brasília, Distrito Federal e de sua região metropolitana.

1.4.2 Objetivos Específicos

- calibrar e validar o modelo Vissim, a fim de torná-lo capaz de simular adequadamente o tráfego das rodovias de múltiplas faixas selecionadas;
- identificar das variáveis de calibração para os modelos do HCM a partir dos dados de campo e de simulação;
- avaliar o comportamento da relação fluxo-velocidade obtido a partir dos dados de campo com os modelos de fluxo livre e de múltiplas faixas do HCM.

1.5 JUSTIFICATIVA

As rodovias de múltiplas faixas no Brasil estão inseridas em áreas suburbanas e rurais estendendo-se ao longo de corredores de alta densidade de tráfego. Apesar de representarem 11,1% de toda a rede rodoviária federal brasileira, que corresponde a 66.712 km, essas rodovias acomodam o maior fluxo de tráfego com as maiores velocidades, sendo de grande importância estratégica para o país (CNT, 2015).

A metodologia do HCM, amplamente utilizada em todo o mundo, é também a principal referência utilizada para estudos rodoviários pela comunidade técnica brasileira (PAULA, 2006), que segue sendo empregada para fins de planejamento, projeto ou decisões sobre a operação dessa infraestrutura. Assim, faz-se necessário investigar em que nível essa metodologia representa a realidade nacional, pois, uma avaliação inapropriada pode impactar de modo significativo trazendo prejuízos em relação ao sistema de transportes, quer seja por subestimação (acarretando custos desnecessários para sua melhoria) ou por superestimação, (acarretando não desenvolvimento de melhorias necessárias e elevando os custos de transporte e ambientais).

Muitos países estudam as vantagens e limitações do HCM, e dentre os achados, há a indicação da necessidade de estudos complementares para cada caso de aplicação. A exemplo, Washburn & Kirschner (2006) indicam que o HCM faz uso da mesma medida de serviço e os mesmos limites de nível de serviço para rodovias próximas a áreas urbanas e rodovias essencialmente rurais; além disso trazem a hipótese de que os resultados fornecidos pelos métodos do referido Manual não representam a percepção dos usuários.

Dessa forma, a presente pesquisa tem por objetivo o estudo de rodovias de múltiplas faixas no Brasil com o emprego do HCM. Assim, buscando-se uma proposta de adequação do HCM por meio da coleta de dados de tráfego em rodovias locais de modo a subsidiar o desenvolvimento de um modelo de fluxo-velocidade que permita gerar um conjunto de curvas para rodovias de múltiplas faixas da região de estudo, para a adequada identificação de nível de serviço.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese está dividida em 7 Capítulos, 4 Apêndices e as referências bibliográficas. A estrutura proposta para o desenvolvimento da pesquisa segue apresentada na Figura 1.3.

Este Capítulo 1 expõe o contexto e a temática da tese, onde é apresentada a descrição do problema, a hipótese, os objetivos, a justificativa para sua realização e a estrutura do documento.

O Capítulo 2, apresenta os aspectos do HCM relativos às teorias e cálculos de capacidade e nível de serviço em rodovias de múltiplas faixas. Essa revisão foi realizada nas versões publicadas de 2010 a 2016 do Manual. O capítulo traz também uma revisão sobre os modelos atuais que descrevem a relação entre o fluxo e a velocidade da corrente de tráfego em rodovias de múltiplas faixas.

O Capítulo 3 detalha o procedimento empregado para a coleta e o tratamento de dados, apresentando as diferentes fases de realização para a construção do banco de dados do projeto. É feita uma caracterização dos trechos rodoviários escolhidos e a justificativa da escolha da amostra empregada no estudo.

O Capítulo 4 traz uma revisão detalhada do simulador Vissim e uma análise dos parâmetros comportamentais do modelo. Por fim é apresentada a metodologia de Algoritmos Genéticos (AG) utilizada para a calibração e o procedimento de validação do modelo de desempenho do simulador.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da calibração e validação do simulador, contemplando as definições sobre a estrutura do Algoritmos Genéticos (AG) empregado, além das configurações necessárias para melhorar a eficiência do processo. Foram realizadas ainda a análise do modelo fluxo-velocidade do HCM e dos procedimentos para estabelecer adequações da metodologia supramencionada.

O Capítulo 6, analisa o modelo fluxo-velocidade do HCM e os procedimentos para estabelecer adequações da metodologia supramencionada mediante o uso do simulador Vissim. Apresenta

o método utilizado para calibrar as curvas fluxo-velocidade, proporcionando um novo conjunto de curvas do modelo de fluxo-velocidade em rodovias de pista dupla.

Por fim, Capítulo 7 trata das considerações finais, onde são apresentadas as conclusões da pesquisa, as principais limitações e as sugestões para trabalhos futuros.

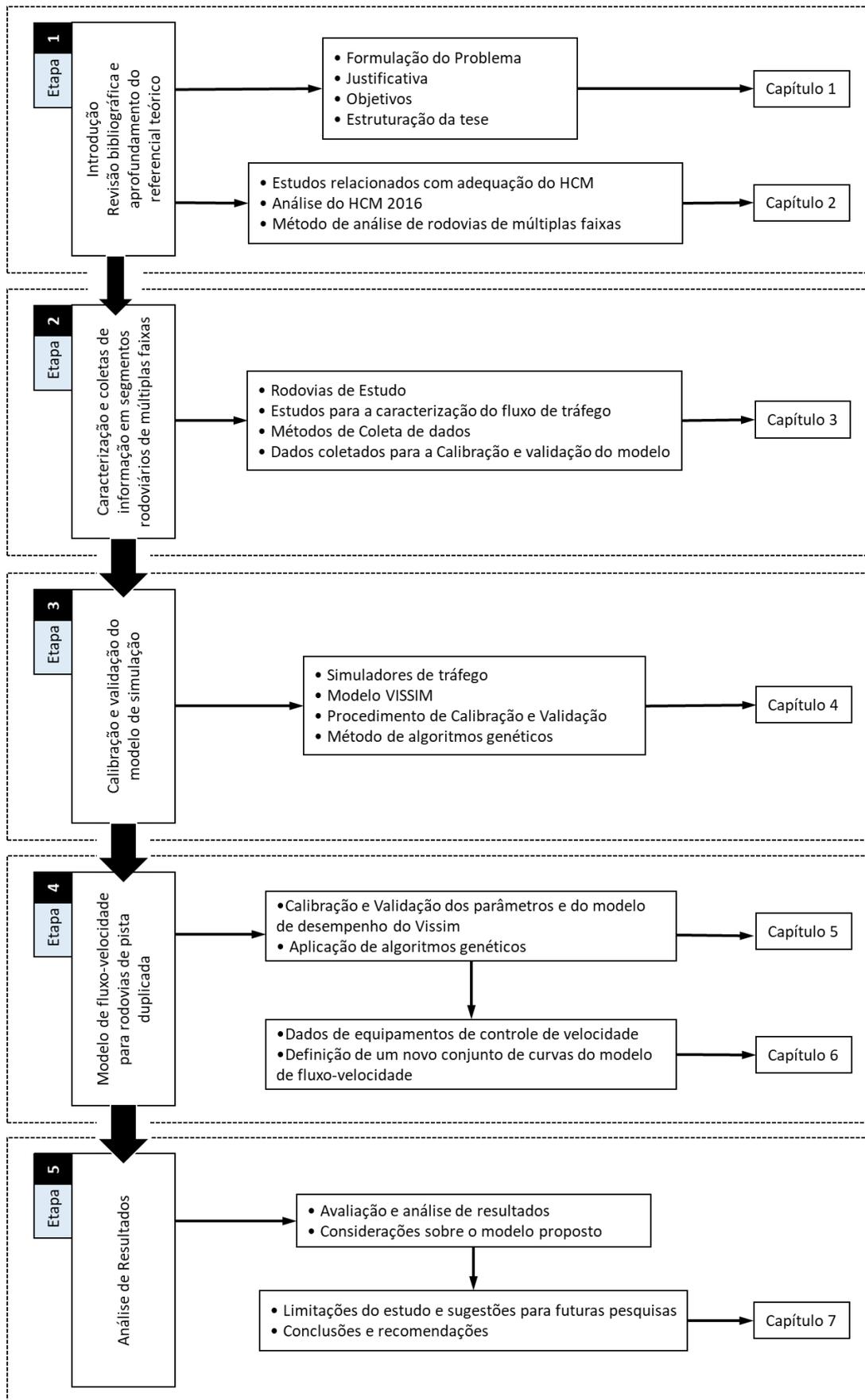


Figura 1.3 – Metodologia e estrutura da Tese

2. MANUAL HCM

2.1 ESTUDOS RELACIONADOS COM A ADEQUAÇÃO DO HCM

O HCM é uma publicação que recompila as investigações feitas nos Estados Unidos para a análise de vias, contendo conceitos e procedimentos de cálculo para estimar a capacidade e o nível de serviço das instalações viárias, utilizadas em todo o mundo (KITTEKSON, 2000). Por esta razão, diferentes pesquisas foram desenvolvidas buscando verificar a adequação das metodologias do manual americano para as condições existentes em outros países, como o Brasil (DEMARCHI & SETTI, 2000).

Com esse propósito, diferentes pesquisas têm sido desenvolvidas em todo o mundo: nos Estados Unidos, por Washburn & Courage (2003); no Brasil, por Gasparini (2002), Paula (2006) e Egami (2006); na Argentina, por Galarraga *et al.* (2001); na Colômbia, por Dueñas-Ruiz & Díaz-Marquez (1998); entre outros. Portanto, justifica-se o estudo dos aspectos necessários para uma adequação do HCM à realidade brasileira.

A pesquisa realizada por Prassas (1999) relata a deficiência nos dados básicos usados pelo HCM para fixar os valores do tempo de percurso. O autor concluiu que o método de cálculo da velocidade apresenta alguns problemas, como a não consideração de giros ocorridos nos trechos entre interseções consideradas e nem a relação entre o tempo de percurso e a taxa de fluxo na via. Além disso, também aponta que as velocidades estimadas por modelos de simulação de tráfego eram maiores que as do HCM em pelo menos 10 km/h; as estimativas da velocidade em movimento não decrescem tão bruscamente com o incremento da densidade semaforica, como é proposto no HCM; e ao contrário dos valores do HCM, as velocidades estimadas pelo modelo de simulação são sensíveis ao aumento do volume de tráfego. Por fim, concluiu que essa deficiência afeta o cálculo da velocidade média global para as vias arteriais urbanas.

Tarko (2000) examinou 116 postos de medições de velocidade em vias arteriais na Índia. Sua análise indica que vários fatores correlacionam com a velocidade de fluxo livre. Entre desses fatores o autor menciona os seguintes: a porcentagem de veículos pesados, a hora do dia, os limites de velocidade, o uso da terra (urbana ou rural), o número de faixas e o tipo de via. Tarko (2000) concluiu que as velocidades foram menores em vias com mais faixas e também que uma

maior porcentagem de veículos pesados se relaciona com a presença de velocidades mais baixas durante o dia, e velocidades altas durante a noite.

No que diz respeito às diversas diferenças que existem entre as rodovias norte americanas e as brasileiras, que podem interferir na estimativa do nível de serviço, segundo Setti (2009), existem duas que podem ser consideradas mais importantes: a relação massa/potência típica dos veículos pesados e a porcentagem de caminhões. Por um lado, o HCM 2000 usa caminhões com relação massa/potência da ordem de 90 kg/kW; por outro lado, um caminhão típico de projeto usado no Brasil, cuja massa/potência é 180 kg/kW, faz com que caminhão usado no HCM 2000 tenha velocidade de equilíbrio da ordem de 80 km/h num aclive de 4%, e o caminhão típico brasileiro tem velocidade de equilíbrio de cerca de 45 km/h no mesmo aclive.

Em relação à composição veicular, destaca-se que, no HCM 2000, não se faz previsão para rodovias com mais de 25% de caminhões, sendo que na região metropolitana de São Paulo a porcentagem de caminhões varia entre 41% a 68%. Por esta razão, fatores de equivalência devem ser obtidos para as condições locais, que incluam as faixas de variação da declividade e do comprimento das rampas e da porcentagem de caminhões no fluxo, bem como da composição do tráfego de veículos pesados (CUNHA & SETTI, 2006).

Devido às diferenças que podem existir em relação à realidade norte-americana, no Brasil, são feitos esforços para a adaptação do HCM, com base em diversos estudos realizados na Escola de Engenharia de São Carlos da USP. Os Estudos de Egami (2006), Mon-Ma (2008) e Bessa Jr. (2009), para rodovias simples, produziram uma calibração para os fatores de equivalência de veículos pesados, efeito das zonas de ultrapassagem proibida e efeito das faixas adicionais, bem como uma adaptação para as funções usadas para estimar as medidas de desempenho diretamente relacionadas ao nível de serviço: Velocidade Média de Viagem (*ATS*) e Porcentagem de Tempo Viajando em Pelotões (*PTFS*).

O trabalho de Egami (2006) trata da adaptação dos fatores usados no método do HCM 2000 para o cálculo do nível de serviço de rodovias de pistas simples para o Brasil, considerando que a composição da corrente de tráfego (em termos de automóveis e veículos pesados), os veículos e os motoristas, podem diferir dos encontrados nos Estados Unidos. Foram obtidos novos valores para os fatores de ajuste usados na metodologia para a estimativa da capacidade e nível

de serviço de rodovias de pistas simples do *Highway Capacity Manual*, edição 2000. Os valores encontrados são os que melhor representam as condições do tráfego encontradas em rodovias de pista simples brasileiras estudadas nesta pesquisa, sendo obtidos através de resultados de simulação (*software TRARR*).

Os estudos mais recentes de Bessa Jr. (2015) propõem medidas de desempenho alternativas à Porcentagem de Tempo Viajando em Pelotões (*PTSF*) e à Velocidade Média de Viagem (*ATS*), que podem ser coletadas diretamente em campo, para descrever a qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil. Usando dados de tráfego sintéticos produzidos com o *CORSIM*, foram desenvolvidos modelos que relacionavam medidas de desempenho alternativas com o fluxo de tráfego unidirecional. Comparações dos valores provenientes dessas relações com dados de campo indicaram que três medidas de desempenho (a velocidade média de viagem dos automóveis; a densidade para automóveis e a densidade de veículos em pelotões) poderiam ser usadas para propor critérios para estimar o nível de serviço em rodovias de pista simples no Brasil.

Para vias expressas (autoestradas) e rodovias de múltiplas faixas (pista dupla), no Brasil, os estudos de Demarchi (2000) e Cunha (2007), obtiveram como principal produto conjuntos de fatores de equivalência para veículos pesados brasileiros, que podem ser usados em substituição aos do HCM. Os valores calculados mais recentemente para os equivalentes veiculares podem ser encontrados em Cunha & Setti (2009).

O primeiro estudo iniciado por Demarchi (2000) foi desenvolver a calibração de um *software* de simulação de tráfego capaz de incorporar os efeitos dos veículos pesados sobre o fluxo de tráfego. Esse *software* é utilizado para estimar valores para os parâmetros de curva fluxo-velocidade a partir de dados coletados em diversos locais de São Paulo. Uma curva fluxo-velocidade foi determinada, para uma velocidade de fluxo livre de 102 km/h. A curva é bastante similar às obtidas em outros estudos, sendo que a velocidade varia pouco, até que o fluxo de 1700 cp/h/faixa seja atingido.

Posteriormente, Cunha (2007) apresentou curvas fluxo-velocidade para valores de velocidade de fluxo livre de 110 e 100 km/h, obtidas usando-se o simulador *CORSIM* calibrado para rodovias do estado de São Paulo. Diferentemente das curvas constantes no HCM 2000 e em

Demarchi (2000), as obtidas pelo autor apresentam uma ligeira queda na velocidade mesmo para pequenos fluxos de tráfego.

No estudo de Cunha & Setti (2009), foram analisados 300 cenários em rodovias de pista dupla, em que a proporção de caminhões variou de 10% a 50%, e as rampas de 2% a 8%, com comprimento variando entre 0,5 e 2 km. Mostrou-se que o HCM 2000 superestima o nível de serviço em 114 dos 300 cenários possíveis, se comparado às estimativas realizadas com a adaptação proposta. Com isso, foi demonstrada claramente a inadequação do HCM 2000 para estimar o nível de serviço em rodovias de pista dupla no Brasil.

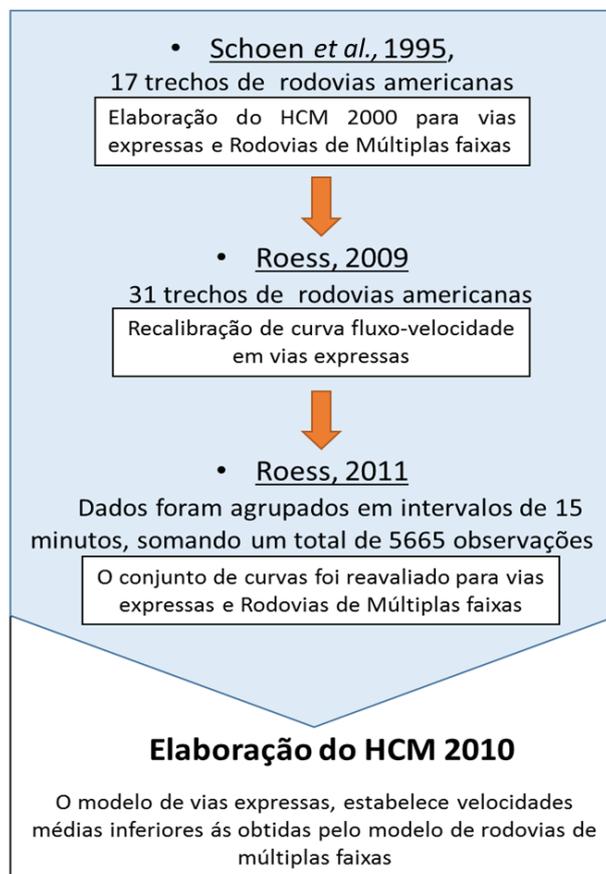


Figura 2.1 – Estudos realizados para a elaboração do HCM 2010

Para a elaboração do HCM 2010 (Figura 2.1), foi realizado um estudo para a recalibração da curva fluxo-velocidade de 120 km/h em vias expressas (ROESS, 2009), que exigiu a coleta de dados para uma ampla faixa de velocidades de fluxo livre. Com essa informação, todo o conjunto de curvas foi reavaliado (ROESS, 2011). Já o modelo para rodovias de múltiplas faixas foi mantido inalterado em relação ao usado no HCM 2000, por falta de recursos para financiar

os estudos necessários para sua substituição. O banco de dados usado nesse estudo (ROESS, 2009) consistiu em 48 trechos em autoestradas americanas, sendo dezesseis pertencentes ao banco de dados que subsidiou a elaboração do HCM 2000 (SCHOEN *et al.*, 1995). Os dados foram agrupados em intervalos de 15 minutos, somando um total de 5.665 observações.

As curvas fluxo-velocidade produzidas (ROESS, 2009) mantiveram a abordagem usada pelo HCM 2000, sofrendo apenas pequenas alterações no formato. Além disso, as equações apresentadas pelo HCM 2010 foram simplificadas, embora consistam essencialmente na mesma formulação matemática constante no HCM 2000 (ROESS, 2011). A principal alteração na edição atual do manual se deu nos valores atribuídos ao ponto em que a velocidade da corrente começa a decrescer (ponto de transição *BP*). A análise dos dados sugeriu que a porção das curvas na qual a velocidade é constante e igual à de fluxo livre, que seria mais curta do que o indicado pelo HCM 2000, sendo os valores da taxa de fluxo correspondentes a esse ponto apresentados pelo HCM 2010 inferiores aos usados na edição anterior.

Com relação à estrutura lógica do conjunto de curvas como um todo, percebe-se que os valores estabelecidos para a capacidade (*C*) são linearmente crescentes em função da velocidade de fluxo livre *FFS*, visto que a densidade na capacidade é admitida como constante. O inverso ocorre com relação aos pontos de quebra *BP*, para as vias expressas. Para as rodovias de múltiplas faixas, *BP* foi considerado constante para todas as curvas (1.400 cp/h/faixa). Em ambos os casos, o caráter linear da relação *BP* – *FFS* se mantém. Por fim, vale destacar que a porção das curvas que liga *BP* a *C* é sempre convexa, mantendo uma transição suave com a porção de velocidade constante.

Uma das dificuldades enfrentadas quando da condução dos estudos que subsidiaram a elaboração do HCM 2010 foi a insuficiência de recursos para a revisão do modelo do HCM 2000 para rodovias de múltiplas faixas. De forma a manter a coerência do método do manual, os pesquisadores não podiam aceitar, para as vias expressas, um modelo que levasse ao estabelecimento de velocidades médias inferiores às obtidas pelo modelo de rodovias de múltiplas faixas, para um mesmo fluxo de tráfego e velocidade de fluxo livre. Dessa forma, foi recomendada, para estudos futuros, a calibração simultânea de curvas para vias expressas e rodovias de múltiplas faixas (ROESS, 2011).

Um estudo mais recente, realizado por Andrade (2012), em rodovias de São Paulo, levou em consideração as recomendações feitas pelos autores envolvidos na elaboração do HCM. Assim, foi demonstrado que existe um intervalo de fluxo no qual a velocidade se mantém constante, que corresponde à velocidade de fluxo livre, bem como foi verificado que a classificação do HCM 2010, entre autoestradas e rodovias de pista dupla, não se mostra adequada para a realidade brasileira.

Por essa razão, o autor divide a amostra estudada em rodovias urbanas e rurais, propondo valores representativos para a capacidade e para a relação fluxo-velocidade. A comparação entre os dois conjuntos de curvas produzidos mostrou que a velocidade média da corrente de tráfego nas rodovias urbanas apresenta uma queda mais precoce e acentuada do que a observada em rodovias rurais. Além disso, os valores estimados para a capacidade C e para a velocidade na capacidade CS para rodovias urbanas são inferiores aos estimados para rodovias rurais.

Em contraste com o modelo do HCM 2010, a principal diferença reside em valores significativamente inferiores para BP , o fluxo a partir do qual se nota um declínio da velocidade em função do aumento da densidade da corrente de tráfego. Outro ponto de destaque é que, embora os valores da capacidade sejam parecidos entre o modelo do HCM 2010 e o calibrado, a velocidade na capacidade CS é superior nas rodovias paulistas.

2.2 DIFERENÇAS ENTRE OS MANUAIS HCM 2010 E HCM 6ª EDIÇÃO

O HCM 6ª Edição proporciona um conjunto de ferramentas mais completas que o HCM 2010, referentes as alterações no comportamento do motorista, na capacidade, na frota de veículos mistos, maior sensibilidade metodológica a fatores que influenciam o desempenho das rodovias e numa maior gama de medidas de desempenho. Assim como também contempla maior ênfase na calibração através de um fator de ajuste de capacidade ($CAFs$) e fatores de ajuste de velocidade ($SAFs$).

A última edição do manual possui metodologias que possibilitam analisar os efeitos da variação da demanda, das condições meteorológicas, dos incidentes de trânsito, das zonas de trabalho e efeito de eventos especiais nas rodovias. Além de incorporar novas pesquisas sobre o efeito dos caminhões nas operações rodoviárias.

A sexta edição do HCM define uma variedade de medidas de rendimento útil para quantificar a confiabilidade do tempo de viagem existente e prognosticado, que consiste em análises e recopilações de observações do tempo de viagem numa instalação durante um período de tempo prolongado (por exemplo: um mês, um ano) para definir a confiabilidade das medidas de desempenho ao longo do tempo.

São apresentadas também duas metodologias para avaliar o efeito de veículos pesados na capacidade e tempo de permanência na via, a primeira por meio de fatores equivalentes a veículos tradicionais de passageiros (*passenger car equivalency – PCE*) que permitem converter um fluxo misto de carros e caminhões em um único fluxo *PCE* uniforme para fins de análise, com uma porcentagem máxima de veículos pesados de 25% e sem o uso do fator de ajuste para a população de condutores utilizado na versão do HCM 2010; e a segunda metodologia foi mediante um modelo de fluxo misto que avalia diretamente a capacidade, velocidade e densidade dos fluxos de tráfego que incluem uma porcentagem de veículos pesados operando.

O método de fluxo misto foi usado para gerar os valores de *PEC*, assim como também foram definidas duas categorias de veículos pesados: caminhões de uma unidade (*single-unit trucks – SUT*) e com reboque (*tractor trailers – TT*). Os ônibus e veículos recreativos se tratam como *SUT* no HCM. Tudo isso com a expectativa que o modelo de fluxo misto forneça um resultado mais preciso quando as porcentagens de caminhões forem altas ou as classificações forem significativas.

Existem alterações de fusões de Capítulos individuais que existiam em versões anteriores de vias expressas (*Basic Freeway*) e rodovias de múltiplas faixas (*Multilane Highway Segments*), devido as características operacionais similares. Nesta última versão, é definida uma equação unificada que representa a relação entre fluxo-velocidade, porém, fazendo com que as curvas para cada tipo de rodovias continuem sendo diferentes (Figura 2.2 e Figura 2.3).

A motivação de desenvolver uma única equação de relação de fluxo-velocidade para vias expressas e rodovias de múltiplas faixas, se dá para assegurar que sob as mesmas taxas de fluxo e condições de *FFS*, o procedimento de vias expressas sempre preverá uma velocidade mais alta que o procedimento de múltiplas faixas, e desta forma solucionar as dificuldades

encontradas por Roess (2011). Outro motivo importante é a não necessidade de especificar a velocidade de fluxo livre (*FFS*) em incrementos de 5 mi/h (NAGUI, 2014).

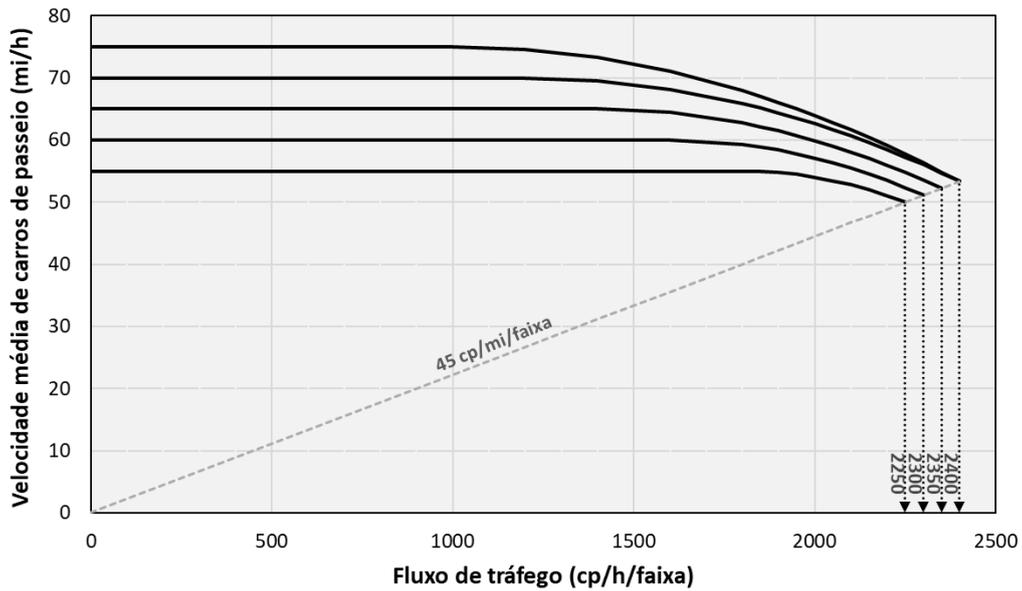


Figura 2.2 – Curvas de velocidade-fluxo para: a) vias expressas

Fonte: adaptação do TRB (2016).

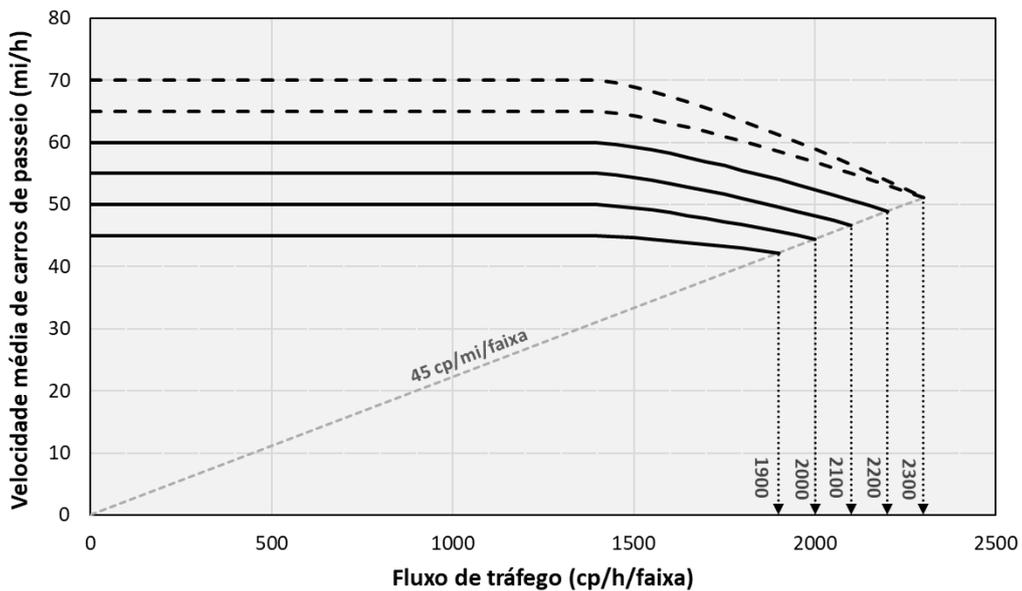


Figura 2.3 – Curvas de velocidade-fluxo para: b) rodovias de múltiplas faixas do HCM 6ª Edição

Fonte: adaptação do TRB (2016).

No Capítulo 12, denominado segmentos básicos de vias expressas e rodovias de múltiplas faixas (“*Basic Freeway and Multilane Highway Segment*”), é descrita a metodologia para avaliar a capacidade, a velocidade, a densidade e o nível de serviço (*LOS*) para seções de rodovias de

várias faixas e sem intersecções importantes que diminuem a velocidade ou param o tráfego na linha principal do fluxo (rodovias que estão fora da área de influência de qualquer segmento de fusão, divergência e cruzamento sinalizado).

Entre as similaridades de metodologias inclui-se uma forma comum para estimar os efeitos atribuídos à quantidade e comprimento das faixas, desobstrução lateral e presença de veículos pesados. Porém, mantém-se inalterado a definição de que uma via expressa (*Freeway*) é uma rodovia separada por um canteiro central com controle total de acesso e duas ou mais faixas em cada direção dedicada ao uso exclusivo de veículos motorizados, e que uma rodovia de múltiplas faixas (*Multilane Highways*) tem no mínimo duas faixas em cada direção, com sinais de trânsito, rotatórias ou intersecções espaceadas a mais de 3,22 quilômetros (2 milhas) de distância, e sem controle total de acessos.

Algumas características que tornam as velocidades e capacidades nas rodovias com múltiplas faixas inferiores às dos segmentos de vias expressas com seções similares, foram incluídas no TRB (2016) definindo que as rodovias de múltiplas faixas, geralmente são encontradas em áreas suburbanas e levam a centros urbanos ou corredores rurais de grande volume, onde conectam duas cidades ou centros de atividades que geram uma quantidade substancial de viagens diárias. Nesta nova versão é incorporado o número de acessos por milha para caracterizar o comportamento da via, sendo que 8 acessos por milha correspondem a segmentos/trechos com características rurais, 16 acessos/mi trechos suburbanos com pouca densidade de veículos e trechos com 25 acessos/mi como trechos suburbanos com alta densidade de veículos (RICHARD *et al.*, 2016).

Nos modelos para vias expressas é incluso o ajuste de capacidade (*CAF*) e o ajuste de velocidade (*SAF*), que são utilizados para ajustar as condições locais ou para levar em consideração as fontes não recorrentes de congestionamento. Os ajustes *CAF* e *SAF* são fornecidos apenas para vias expressas, uma vez que não há investigações empíricas para efeitos equivalentes de redução de capacidade em rodovias de múltiplas faixas. Outro aspecto muito importante incorporado nas vias expressas são os efeitos das faixas gerenciadas, destinadas a veículos de alta ocupação (*high-occupancy vehicle – HOV*) e aos locais de pagamento dos pedágios (*high-occupancy/toll – HOT*).

Na sexta edição do HCM, as curvas fluxo-velocidade para vias expressas e rodovias de múltiplas faixas, sob condições de base, seguem uma forma comum, que inicia-se com um intervalo de velocidade constante até um ponto de quebre (*BP*), uma faixa de velocidade decrescente e finaliza com uma densidade na capacidade de aproximadamente 28 cp/km/faixa (45 cp/mi/faixa). Porém, a maior diferença nas curvas é que os valores de *BP* para vias expressas continuam diretamente relacionados à os valores de *FFS* e para as rodovias de múltiplas faixas o valor de *BP* continua sendo constante a 1.400 cp/h/faixa, descartando nesta última versão os valores da densidade que variavam entres 25 e 28 cp/km/faixa (40 e 45 cp/mi/faixa) e definido um valor fixo igual aos das vias expressas.

A calibração das curvas de fluxo-velocidade e a criação de uma equação comum para representar as vias expressas e rodovias de múltiplas faixas, permitiu estimar valores de velocidades médias a partir de valores de *FFS* entre 120 km/h e 90 km/h (75 e 55 mi/h) em vias expressas e para rodovias de múltiplas faixas a partir de valores entre 113 km/h e 72 km/h (70 e 45 mi/h), incorporando nesta nova versão as curvas de 113 km/h e 105 km/h (70 e 65 mi/h) para rodovias de múltiplas faixas, com as premissas que devem ser usadas com precaução já que os dados que serviram para gerar essas condições foram limitados.

Por fim, para todos os níveis de serviço (*LOS*), os limites de densidade em vias expressas são os mesmos das rodovias de múltiplas faixas. As características do tráfego, são tais que os fluxos máximos em qualquer *LOS* são menores em rodovias de múltiplas faixas do que em vias expressas semelhantes.

2.3 CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE MÚLTIPLAS FAIXAS

2.3.1 Capacidade em rodovias de múltiplas faixas

As rodovias de múltiplas faixas (*MF*) localizadas em áreas rurais, caracterizam-se por terem fluxos de tráfego inferiores aos da capacidade da via, dificultando as observações em campo de fluxos iguais ou superiores aos da sua capacidade, que às vezes podem acontecer nas proximidades dos locais do pedágio.

Diferentemente dos entornos rurais, é comum que as condições operacionais das rodovias suburbanas de *MF* operem em condições de fluxo iguais aos de sua capacidade, devido ao alto nível de ocupação e utilização das faixas (causado pela formação de filas nas saídas e entradas das cidades), bem como à transição de segmentos de vias expressas para segmentos de múltiplas faixas, onde a ocupação de veículos de grande porte concorre com as atividades dos pedestres.

O HCM define as condições básicas sob as quais a capacidade total de um segmento de rodovia de múltiplas faixas é atingida. Essas condições padrão incluem bom tempo (sem chuva, granizo etc.), boa visibilidade, nenhum incidente ou acidentes, ausência de obras e serviços que interfiram na circulação do tráfego e pavimento em boas condições, que não afete a operações.

Para rodovias de *MF*, o HCM ainda especifica entre as condições padrão: faixa de tráfego entre 3,60 e 3,0 m (12 -10 pés) de largura; acostamentos ou desobstrução lateral de pelo menos 1,80 m (6 pés) de largura, sem obstáculos ou objetos; corrente de tráfego formada apenas por automóveis (carros de passeio); e pelo menos 2 faixas de tráfego em cada sentido. Em muitos segmentos, as condições locais diferem das condições padrão, nestes casos, o método prevê ajustes para refletir condições diferentes das ideais.

A capacidade refere-se à taxa de fluxo médio em todas as faixas, portanto, um segmento de *MF* de duas faixas com dois sentidos opostos (pista dupla), com *FFS* de 60 mi/h, tem uma capacidade esperada de $2 * 2.200 = 4.400$ cp/h. Este fluxo não estaria distribuído uniformemente nas duas faixas, pois uma faixa pode ter fluxos estáveis acima de 2.200 cp/h/faixa (TRB, 2010).

Para determinar a capacidade sob as condições básicas indicadas anteriormente é utilizada a Equação (2.1). A análise da capacidade das rodovias de múltiplas faixas estuda separadamente cada sentido e o volume médio diário de uma rodovia normalmente é o mesmo nos dois sentidos. No entanto, os volumes nas horas de pico podem ser diferentes (DNIT, 2006). Isso frequentemente ocorre nas grandes cidades, onde é comum o pico da tarde (volta para casa) ser superior ao da manhã (ida para o trabalho). Por esta razão é importante determinar os volumes horários por sentido nas horas pico, porque o valor a ser adotado para a capacidade básica deve ser o do sentido mais carregado.

$$Capacidade = SF_E = MSF_E \times N \times f_{HV} \quad (2.1)$$

Onde:

SF_i = taxa de fluxo de serviço (no sentido de pico) para o LOS_E (veíc/hora);

MSF_E = máxima taxa de fluxo de serviço LOS_E (cp/h/faixa);

N = número de faixas por sentido;

f_{HV} = fator de ajuste para veículos pesados.

A Equação (2.1), parte do conceito de colapso da corrente de tráfego, que pode ser definido como a transição entre um padrão operacional adequado e as condições de fluxo congestionado (BRILON *et al.*, 2005). Em uma rodovia de múltiplas faixas, esse fenômeno pode ser identificado quando a velocidade média da corrente de tráfego repentinamente cai abaixo de um nível aceitável (que corresponde ao nível E). Sob essa premissa, a capacidade pode ser definida como o fluxo máximo que pode ser atingido antes que ocorra o colapso do sistema.

2.3.2 Nível de serviço em rodovias de múltiplas faixas

Os principais parâmetros associados ao nível de serviço são a velocidade, a liberdade de movimentação do veículo no fluxo de tráfego e a proximidade entre os veículos (densidade). Como as velocidades são constantes em uma ampla faixa de taxas de fluxo, os níveis de serviço (LOS) são definidos baseados na densidade, que medem a proximidade dos veículos entre si no fluxo de tráfego.

Os níveis de serviço são classificados por A , B , C , D , E e F , para representar estágios progressivos de agravamento e saturação do fluxo de tráfego. O máximo fluxo de serviço, denominado capacidade, é atingido no nível de serviço “ E ”. Os níveis “ A ” e “ B ” representam condições de fluxo livre com manobras de total liberdade e levemente restringida respectivamente. O nível “ C ” representa um fluxo estável, em que as interferências que afetam a circulação e a velocidade desejada são toleráveis.

Nos regimes de fluxo característicos dos níveis de serviço “ D ” e “ E ”, os fluxos são inferiores à capacidade, muitas vezes da mesma ordem que os fluxos observados quando a via opera congestionada, no nível “ F ”. Neste último nível mencionado, a densidade é tão alta que o fluxo entra em colapso, causando a queda das velocidades e do fluxo de veículos. O fluxo opera em congestionamento, alternando momentos de fluxo sob velocidades muito reduzidas com

paradas e momentos de velocidades maiores, mais próximas, porém, sem atingir a velocidade de projeto da via. Nessas condições, os fluxos de tráfego podem variar grandemente, no entanto, sendo sempre inferiores à capacidade.

2.4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE ANÁLISES DE RODOVIAS DE MÚLTIPLAS FAIXAS

Segundo TRB (2016) esses tipos de instalações que exigem altos padrões de qualidade e alto custo por quilômetro, geralmente localizam-se em entornos suburbanos, situados nas saídas das cidades, como solução de contornos ou anel perimetral, e também nos entornos rurais que servem de ligação para zonas densamente povoadas, permitindo o fácil deslocamento e maiores velocidades (Figura 2.4, Figura 2.5, Figura 2.6 e Figura 2.7).

Destaca-se, ainda, que as análises de uma rodovia podem ser feitas pela composição de vários segmentos, os quais, por meio de sua análise individual, permitem obter o rendimento de todo um trecho de via (Figura 2.8).

A metodologia do HCM é utilizada para a análise de um ou mais segmentos de uma rodovia, sempre que eles tenham uma extensão acima de 3,22 quilômetros (2 milhas), podendo ser de sentido único ou duplo, devendo cada sentido ser analisado separadamente. Os segmentos analisados caracterizam-se por terem um tipo de controle de tráfego (semáforo, sinais de pare o ceda a preferência) ou outra forma de controle de cruzamento de tráfego que interrompem o fluxo, que definem o início e o fim do segmento (Figura 2.9).



Figura 2.4 – Rodovias de múltiplas faixas suburbana dividida

Fonte: adaptação de TRB (2016).



Figura 2.5 – Rodovias de múltiplas faixas suburbana não dividida
 Fonte: adaptação de TRB (2016).

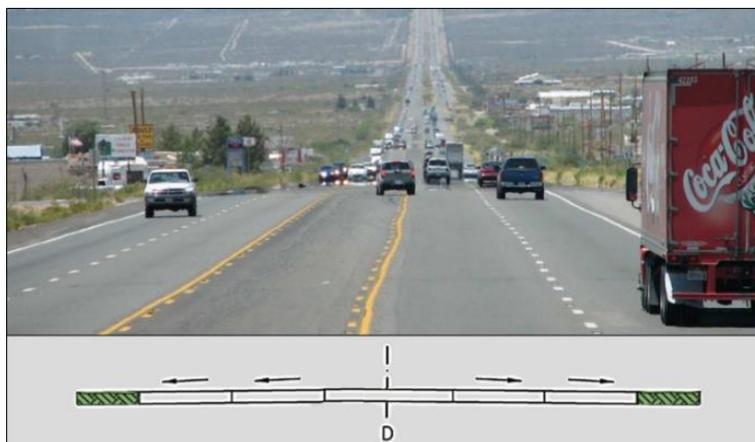


Figura 2.6 – Rodovias de múltiplas faixas suburbana com conversão a esquerda (TWLTL)
 Fonte: adaptação de TRB (2016).

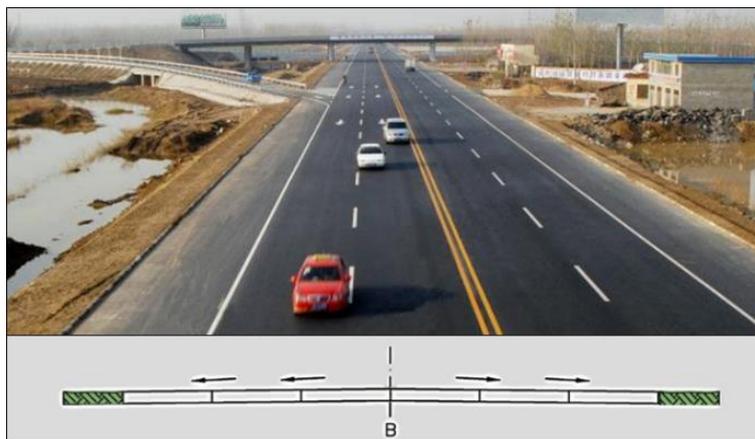


Figura 2.7 – Rodovias de múltiplas faixas rural não dividida
 Fonte: adaptação de TRB (2016).

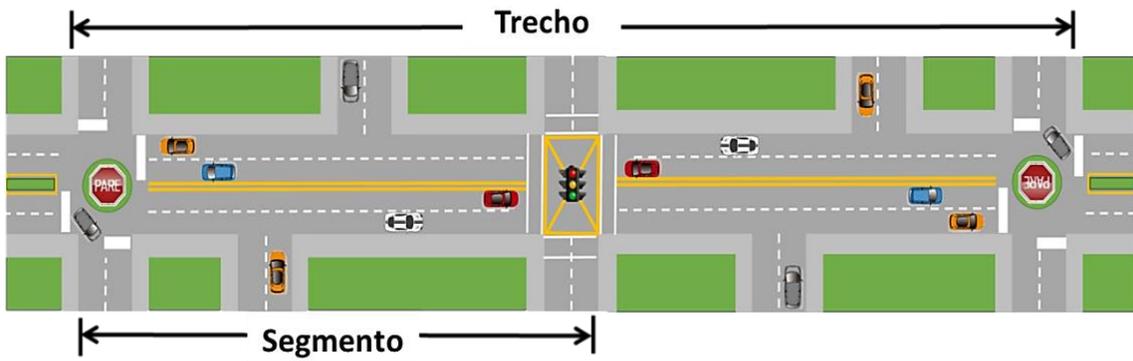


Figura 2.8 – Elementos de Análise em trechos de rodovias de múltiplas faixas

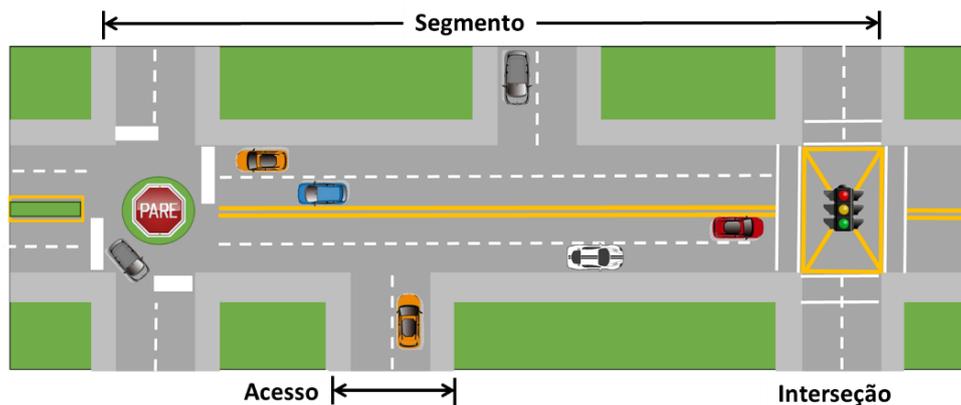


Figura 2.9 – Elementos de Análise de segmentos em rodovias de múltiplas faixas

Os pontos de controle onde devem ser estabelecidos os limites de cada segmento básico são apresentados no Quadro 2.1. Uma vez determinados os segmentos que conformam um trecho de uma rodovia, a análise do HCM também contempla uma classificação qualitativa de cada segmento em função do grau de inclinação do terreno, sendo classificados como terreno plano, ondulado e terreno específico com *greide*.

O HCM considera em suas metodologias uma série de cálculos baseados em modelos de análise de fluxo de tráfego. Os cálculos usados para estimar o comportamento das rodovias de múltiplas faixas, para um segmento de via, podem ser caracterizados por três medidas de desempenho, conhecidas como a velocidade média viagem (km/h), a densidade dos veículos de passeio (cp/km/faixa) e o valor v/c é a relação fluxo/capacidade. O cálculo e a determinação desses parâmetros servem para aferir o nível de serviço das rodovias *MF*. As variáveis que são tomadas em consideração para o cálculo do nível de serviço são mostradas na Figura 2.10.

Quadro 2.1 – Segmentos relacionados à segurança viária, intervenções e benefícios

PONTOS ESTABELECIDOS PARA SER LIMITES DOS SEGMENTOS BÁSICOS
<ul style="list-style-type: none"> • Mudança no número de faixas da via; • Alteração no tipo de separação dos fluxos opostos; • Mudanças na inclinação do alinhamento vertical em 2% ou mais, ou presença de um aclave com inclinação constante comprimento superior de 1220 m; • Presença de semáforos, sinal de PARE ou rotatória ao longo da via com múltiplas faixas; • Mudança significativa na densidade de pontos de acesso. • Mudança na velocidade limite estabelecida. • Presença de ponto de acesso com um número ou percentagem significativa de veículos que entram ou saem da via. • Presença de pontos de críticos para a circulação do tráfego.

Fonte: adaptação de TRB (2016).

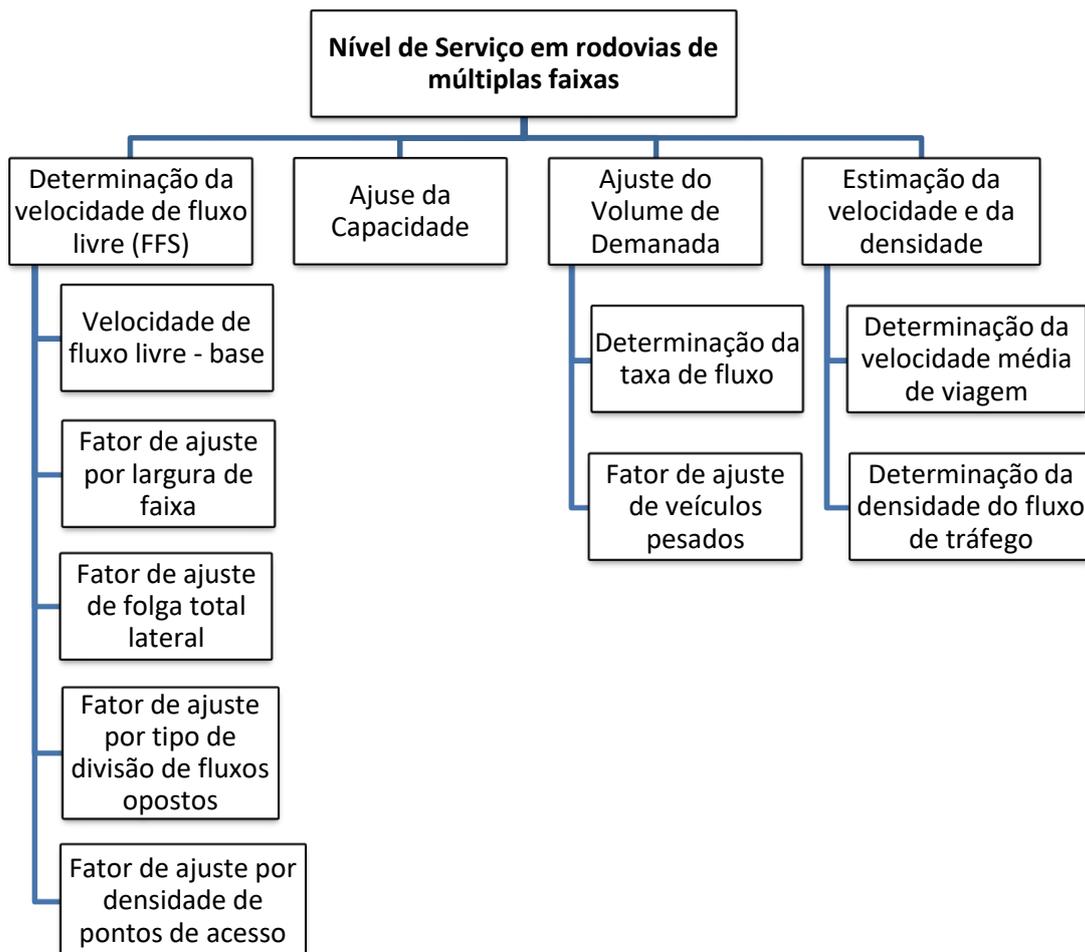


Figura 2.10 – Metodologia para rodovias de múltiplas faixas

2.4.1 Limitações da Metodologia

Em geral, a metodologia do HCM e as variáveis anteriormente mencionadas podem ser usadas para avaliar o desempenho da maioria dos fluxos de tráfego dos veículos que viajam ao longo de um segmento de uma rodovia. No entanto, a referida metodologia não leva em consideração o efeito das seguintes condições no funcionamento operacional de um segmento de uma via:

- impacto de condições meteorológicas adversas, acidentes e incidentes de trânsito, cruzamentos rodoferroviários e obras na pista;
- interferências provocadas por estacionamentos nos acostamentos;
- efeito da alteração no número de faixas no início ou término do segmento;
- impacto da formação de filas na transição de um segmento de múltiplas faixas para um segmento com duas faixas e dois sentidos de tráfego;
- diferença entre os vários tipos de separador central para a divisão de fluxos opostos;
- velocidades de fluxo livre superiores a 113 km/h (70 mi/h) e inferiores a 72 km/h (45 mi/h); e
- condições comumente presentes em vias arteriais urbanas e suburbanas (estacionamento, pontos de parada de ônibus e circulação de pedestres).

Se na análise de uma rodovia que tenha uma ou mais dessas limitações, que possam ter uma importante influência no desempenho de uma via, deve-se considerar a utilização de outras metodologias ou ferramentas.

2.5 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE FLUXO LIVRE (*FFS*)

O HCM define a velocidade de fluxo livre (*FFS*) como a média das velocidades desejáveis de todos os motoristas em um segmento ou seção de uma via, observadas durante condições de volumes de tráfego muito baixos e enquanto os motoristas não são afetados pela presença de outros veículos ou pela sinalização. Essa velocidade está relacionada com as condições geométricas da via, as características de uso do solo, atividades de pedestres, densidade de pontos de acesso, espaçamento entre as interseções controladas e sua velocidade limite.

A *FFS* pode ser determinada diretamente com medidas de campo ou estimada conforme o HCM. Quando é determinada em campo, o estudo da velocidade deve ser conduzido num local representativo do segmento e horário onde as taxas sejam inferiores a 1.000 cp/h/faixa e deve ser obtida uma exibição de velocidade de pelo menos 100 carros de passeio. Caso não seja possível fazer as medidas de campo, em tais situações a *FFS* do segmento é estimada sobre a base de uma velocidade inicial e de fatores de ajuste geométricos, Equação (2.2):

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{TLC} - f_M - f_A \quad (2.2)$$

Onde:

FFS = velocidade de fluxo livre de um segmento básico (mi/h);

BFFS = *FFS* básica para o segmento (mi/h);

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

f_{TLC} = fator de ajuste para desobstrução lateral total – direita e esquerda (mi/h);

f_M = fator de ajuste para o tipo de divisão dos fluxos opostos (mi/h); e

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

Em relação a *BFFS* não há muitas informações disponíveis para estabelecer um valor básico. De certa forma, pode ser usada a velocidade de projeto ou os limites de velocidade como a *BFFS*, para representar a *FFS* potencial baseado apenas no alinhamento horizontal e vertical da via, mas não nos impactos de largura de faixa, folgas laterais, tipos de meio e pontos de acesso.

Embora os limites de velocidade não estejam definidos uniformemente, a *BFFS* pode ser estimada, se necessário, como os limites de velocidade impostos, mais 8 km/h (5 mi/h) para limites de velocidade maiores ou iguais a 80 km/h (50 mi/h), ou, ainda, como limite de velocidade mais 11 km/h (7 mi/h), para velocidades inferiores a 80 km/h (50 mi/h).

2.5.1 Ajuste da largura de faixa

A condição básica para a largura da faixa é ser maior ou igual a 3,6 km (12 pés). Quando a média de largura de faixas entre todas as faixas é inferior dos 3,6 km (12 pés), a *FFS* é negativamente afetada. Os ajustes para refletir o efeito de largura de faixa média-baixas são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fator de ajuste para largura da faixa

LARGURA DA FAIXA (pés)	REDUÇÃO EM <i>FFS</i> , f_{LW} (mi/h)
≥ 12	0.0
$\geq 11-12$	1.9
$\geq 10-11$	6.6

Fonte: adaptação de TRB (2016).

2.5.2 Ajuste para desobstrução lateral

A desobstrução lateral total (*TLC*) é calculada pela soma da desobstrução lateral à direita e à esquerda da pista analisada. São consideradas obstruções laterais, postos de iluminação, placas, árvores, suportes laterais, cercas de pontes, barreiras de tráfego e muros de contenção. A Equação (2.3) é usada para determinar a *TLC*.

$$TLC = LC_R + LC_L \quad (2.3)$$

Onde:

TLC = desobstrução lateral total (pés) (máximo de 12 pés);

LC_R = desobstrução lateral direita (pés) (máximo de 6 pés); e

LC_L = desobstrução lateral esquerda (pés) (máximo de 6 pés).

A desobstrução do lado direito é medida a partir da borda direita das faixas de trânsito até a obstrução lateral mais próxima. Já a desobstrução do lado esquerdo é medida a partir da borda esquerda da pista até a obstrução mais próxima localizada na área que separa os fluxos opostos. A Tabela 2.2 apresenta a redução na *FFS* devido a desobstruções laterais na rodovia de múltiplas faixas.

Tabela 2.2 – Redução de *FFS* por desobstrução lateral da faixa

QUATRO FAIXAS		SEIS FAIXAS	
<i>TLC</i> (pés)	REDUÇÃO EM <i>FFS</i> (mi/h)	<i>TLC</i> (pés)	REDUÇÃO EM <i>FFS</i> (mi/h)
12	0,0	12	0,0
10	0,4	10	0,4
8	0,9	8	0,9
6	1,3	6	1,3
4	1,8	4	1,7
2	3,6	2	2,8
0	5,4	0	3,9

Fonte: adaptação de TRB (2016).

Quando a separação de fluxos opostos é realizada por barreiras que não afetem o comportamento do condutor e estas estiverem a uma distância maior ou igual a 0,71 m (2 pés) do bordo esquerdo da pista, um valor de 1,83 m (6 pés) é adotado para desobstrução lateral esquerda. Para rodovias de múltiplas faixas não divididas ou que apresentam um faixa central de conversão à esquerda com duplo sentido (*TWLTL*), um valor de 1,83 m (6 pés) é aplicado para a desobstrução lateral esquerda.

2.5.3 Ajuste para o tipo de divisão dos fluxos opostos

O ajuste para o tipo de divisão é apresentado na Tabela 2.3. As rodovias de múltiplas faixas sem divisão reduzem a *FFS* em 2,57 km/h (1,6 mi/h).

Tabela 2.3 – Fator de ajuste por tipo de divisão dos fluxos opostos

Tipo de divisão	Redução em <i>FFS</i> , f_M (mi/h)
Não dividida	1,6
<i>TWLTL</i>	0,0
Dividida	0,0

Fonte: adaptação de TRB (2016).

2.5.4 Ajuste para densidade de pontos de acesso

A densidade de pontos de acesso (número de acessos por milha) é calculada pela divisão do número total de pontos de acessos (interseções não semaforizadas e acessos a propriedades), situados no lado direito da pista considerada, pela extensão do segmento analisado (em milhas). São considerados somente os pontos de acesso que afetam o fluxo de tráfego. Estudos indicam que para cada ponto de acesso por km (milha), o *FFS* estimado diminui em aproximadamente 0,40 km/h (0,25 mi/h), independentemente do tipo de divisão do fluxo oposto. A Tabela 2.4 apresenta o ajuste de *FFS* para vários níveis de densidade de pontos de acesso.

Tabela 2.4 – Fator de ajuste para densidade de pontos de acesso

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

Fonte: adaptação de TRB (2016).

2.6 AJUSTE DA CAPACIDADE

A capacidade de um segmento de rodovia de múltiplas faixas está em função da *FFS* e pode ser estimada diretamente com a Equação (2.4). Sendo que o resultado dessa capacidade *C* nunca pode exceder o valor de 2.300 cp/h/faixa, da mesma forma a *FFS* usada nessa equação não deve exceder os 113 km/h (70 mi/h).

$$C = 1.900 + 20 * (FFS - 45) \quad (2.4)$$

2.7 AJUSTE DO VOLUME DE DEMANDA

As curvas básicas de fluxo-velocidade estão baseadas em taxas de fluxo de carros de passeio equivalentes por hora, a partir do volume horário por sentido, que representam a população dominante de motoristas, normalmente usuários dos segmentos da rodovia de múltiplas faixas.

Volumes de demanda expressos como veículos por hora sob condições prevaletentes devem ser convertidos para essa base. A Equação (2.5) é usada para esse tipo de ajuste.

$$v_p = \frac{V}{FHP \times N \times f_{HV}} \quad (2.5)$$

Onde:

v_p = taxa de fluxo sob condições básicas equivalentes (cp/h/faixa);

V = volume horário nas condições existente, na hora-pico e sentido de pico (vph);

FHP = fator horário de pico;

N = número de faixas de trânsito no sentido considerado; e

f_{HV} = fator de ajuste para veículos pesados.

Em rodovias de múltiplas faixas, o FHP varia tipicamente entre 0,75 e 0,95. Valores mais baixos são típicos de condições de volumes inferiores e valores mais altos são típicos de condições de horário de pico urbano e suburbano.

2.7.1 Ajuste de veículos pesados

Um veículo pesado é definido como qualquer veículo com mais de quatro rodas no chão, durante a operação normal. Tais veículos são geralmente categorizados como caminhões unitários (*SUT*) e de reboque (*TT*). Os ônibus e veículos recreativos (com motor próprio e pequenos trailers para barcos, veículos para terrenos diversos, ou outros itens) são considerados como *SUT*. O fator de ajuste para veículos pesados é calculado usando-se a Equação (2.6).

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1)} \quad (2.6)$$

Onde:

f_{HV} = fator de ajuste de veículos pesados;

P_T = proporção de *SUT* e *TT* na corrente de tráfego (decimal); e

E_T = equivalente em carros de passeio de um veículo pesado no fluxo de tráfego.

Quando o efeito de veículos pesados no fluxo de tráfego depende do terreno e das condições da pista (*grade conditions*), bem como da composição do tráfego, os valores de E_T podem ser obtidos das seguintes formas:

- levando-se em conta as características gerais do terreno (plano e ondular);
- considerando situações específicas de aclive ou situações específicas de declives.

a) Características gerais do terreno

Refere-se a comprimentos estendidos de autoestrada de múltiplas faixas com um número de inclinações e declives, onde nenhuma inclinação é comprida ou íngreme suficiente para ter um impacto significativo na operação do segmento:

- Relevo Plano (*Level terrain*): permite veículos pesados manterem a velocidade que carros de passeio. Estes terrenos geralmente contêm inclinações de não mais que 2%;
- Relevo Ondulado (*Rolling terrain*): qualquer combinação de alinhamentos horizontais e verticais que fazem com que veículos pesados reduzam sua velocidade substancialmente abaixo da de carros de passeio.

A Tabela 2.5 apresenta os valores de E_T em segmentos com características gerais de terreno.

Tabela 2.5 – Valores de E_T por tipo de terreno

Equivalente de carros de passeio	Tipo de Terreno	
	Plano	Ondulado
E_T	2,0	3,0

Fonte: adaptação de TRB (2016).

b) Situações específicas de aclave

O manual recomenda que sejam consideradas como um segmento separado as rampas com inclinação entre 2% e 3%, e extensão maior ou igual a 0,80 km (0,5 mi), ou com inclinação maior ou igual a 3% da extensão maior que 0,40 km (0,25 mi).

O manual HCM traz nas seções de *Exibição 12-26*, *Exibição 12-27* e *Exibição 12-28*, os valores de E_T , para mistura de *SUT/TT* de 30%/70%, 50%/50% e 70%/30%. A condição de 30% de *SUT* ocorre com mais frequência em instalações rurais; a condição de 50% ocorre com mais frequência em instalações urbanas.

2.8 ESTIMATIVA DA VELOCIDADE E DA DENSIDADE

Com a informação da taxa de fluxo de demanda em carros de passeio por faixa e a curva de *FFS* selecionada, pode ser determinada a velocidade e a densidade do fluxo de tráfego, mediante a Equação (2.7):

$$D = \frac{v_p}{S} \quad (2.7)$$

Onde:

D = densidade (cp/mi/faixa);

v_p = taxa de fluxo sob condições básicas equivalentes (cp/h/faixa); e

S = velocidade média da corrente de tráfego sob condições básicas (mi/h) (velocidade média de viagem).

A Tabela 2.6 apresenta os níveis de serviço de acordo com a velocidade de fluxo livre e a densidade máxima de tráfego na rodovia.

Tabela 2.6 – Determinação do nível de serviço para rodovias de múltiplas faixas

LOS	DENSIDADE (cp/mi/faixa)
A	≤ 11
B	$> 11-18$
C	$> 18-26$
D	$> 26-35$
E	$> 35-45$
F	Demanda excede a capacidade >45

Fonte: adaptação de TRB (2016).

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O HCM tem limitações que decorrem, principalmente, de algumas características de infraestrutura viária existentes, como a presença de pardais ou radares que limitam a velocidade dos motoristas, variando seu comportamento de condução e também devido às características geométricas das vias, que não permitem velocidades tão altas como as previstas no manual – à razão de 113 km/h para rodovias de múltiplas faixas (TRB, 2016). Essas velocidades foram propostas considerando-se o uso do solo existente em áreas rurais, onde existe a possibilidade de que sejam atingidas; já em áreas suburbanas, essas velocidades podem não serem desenvolvidas devido à os maiores fluxos de tráfego que atingem a capacidade das rodovias.

A velocidade *BFFS* é determinada em função da velocidade limite das vias, tendo em vista que essa velocidade leva em consideração todos os parâmetros geométricos e fatores ambientais necessários para a elaboração de um projeto viário (TRB, 2010). Por esta razão, as variáveis mencionadas não são tomadas para determinação da velocidade média de viagem, o que pode estar incorreto devido ao fato de que, na maioria das vezes, essa velocidade limite regulamentada para o projeto de uma via não representa a velocidade real que os motoristas praticam. Portanto, é importante verificar a velocidade praticada em campo e analisar enquanto ela se afasta ou se aproxima da velocidade limite.

A metodologia para avaliar o efeito de veículos pesados do HCM de fatores de equivalentes de carros de passeio (*PCE*) não incorporar porcentagens de caminhões superiores a 25% em determinados segmentos de rodovias e existem instalações que têm porcentagens de caminhões

maiores do que isso. Os fluxos de veículos pesados, na maioria das rodovias brasileiras, representam porcentagens maiores que os estimados pelo manual. Outro aspecto importante são os fatores equivalentes de carros de passeio (*PCE*) do HCM que não consideram a variação da frota e a influência da proporção de caminhões (CUNHA & SETTI, 2006). Na maioria dos casos o HCM agrupa estes tipos de veículos, assim como os ônibus e os caminhões geralmente são assignados por valores de *PCE* idênticos.

Com relação a capacidade do HCM para modelar os efeitos dos caminhões no fluxo de tráfego, não há uma metodologia específica que reflita o espectro de capacidade de rendimento dos caminhões da frota Brasileira. O HCM assume um só tipo de caminhões, que foi calibrado utilizando uma combinação de caminhões e ônibus com uma relação de peso e potência entre 125 e 150 lb/hp (ELEFTERIADOU *et al.*, 2007). As características dos veículos (pesados) em conjunto com o tipo da topografia brasileira (inclinações e extensão do aclave), apresentam condições operacionais diferentes das existentes nos Estados Unidos. Desse modo, não seria razoável aplicar o manual norte-americano automaticamente ao contexto brasileiro, pois isso poderia gerar uma avaliação de capacidade e de nível de serviço equivocada.

Conclui-se que uma adaptação do HCM ao contexto brasileiro é de suma importância, visto que será uma alternativa com grande potencial de acerto ou confiabilidade nas estimativas de nível de serviço. Conforme indicado por diversos estudos já realizados (WASHBURN *et al.*, 2010), Gasparini (2002), Paula (2006), Egami (2006), Galarraga *et al.* (2001) e Dueñas-Ruiz & Díaz-Marquez (1998), as adaptações do HCM para rodovias brasileiras produzem resultados mais próximos do nível de serviço real.

Quanto as condições próximas à capacidade e níveis de fluxo intermediários deverão ser adaptados no presente estudo mediante a determinação em campo das condições padrão que definam as características das rodovias de múltiplas faixas.

Por fim, as metodologias do HCM não devem ser utilizadas como uma regra para a avaliação das rodovias de múltiplas faixas. Elas devem ser empregadas como uma guia de cálculo a ser ajustado e modificado conforme cada tipo de condição.

3 CARACTERIZAÇÃO E COLETA DE INFORMAÇÃO EM TRECHOS RODOVIÁRIOS DE MÚLTIPLAS FAIXAS

A metodologia utilizada para a obtenção dos dados que permitiram atingir os objetivos desta pesquisa é apresentada no presente Capítulo, onde são definidas as áreas de estudo e os segmentos selecionados, bem como os tipos de estudos empregados.

Com relação às áreas de estudo, segundo FHWA (2013) a classificação de uma instalação em área urbana e rural no HCM é feita com base na definição de fronteira urbanizada ajustada aos dados do Censo Americano, determinando que uma área urbanizada tem uma população maior de 50.0000 habitantes, uma área em limite urbano-rural entre 50.000 e 5.000 habitantes e uma área rural menor de 5.000 habitantes.

As principais diferenças existentes nos segmentos rurais e urbanos consistem no espaçamento entre acessos do tipo controlados, por exemplo, o pare, os semáforos, o “dê preferência”, etc, que são tipicamente menores em segmentos de rodovias urbanas e também na quantidade de acessos do tipo não controlados, por exemplo, as entradas e saídas sem dispositivo de controle, que são mais frequentes para as vias em áreas rurais (TRB, 2016). E existem os segmentos que se encontram localizados nas áreas de limite urbano-rural, que são áreas de natureza urbana, mas que carecem de população, que se incluem como áreas urbanas denominadas para este estudo como suburbanas.

Considera-se que as rodovias de múltiplas faixas são responsáveis por grande parte do tráfego nas áreas urbanas e rurais do Distrito Federal. Dessa forma, foram coletadas amostras de dados referentes a rodovias de múltiplas faixas que ligam atualmente a cidade de Brasília com os municípios de Goiás, para poder verificar a adequação da metodologia do HCM para este tipo de vias e propor as adaptações necessárias para sua utilização na realidade local, empregando métodos de análise estatísticos e programas de simulação, como o Vissim.

O sistema rodoviário de múltiplas faixas (pista dupla) que compõe esta região contempla as rodovias radiais federais (DNIT, 2006), BR-020, BR-040, BR-060 e BR-070, que servem de meio de transporte de longa distância, permitindo o escoamento de produtos agrícolas para o abastecimento de zonas urbanas. Essas rodovias conectam a zona urbana de Brasília com as

zonas urbanas dos municípios de Anápolis, Goiânia, Luziânia, Águas Lindas de Goiás, Formosa, Valparaíso, Novo Gama e Planaltina de Goiás, que correspondem aos municípios mais próximos do Distrito Federal.

Por este motivo, foram escolhidos trechos das vias arteriais BR-020, BR-040, BR-060 e BR-070 no Distrito Federal e no Estado de Goiás, sendo selecionados vários segmentos nessas vias para a realização das pesquisas de campo, considerando-se como segmento a definição utilizada pelo HCM 6ª Edição.

3.1 RODOVIAS DE ESTUDO

Nos últimos cinquenta anos, o Brasil construiu uma rede de rodovias rurais, urbanas e suburbanas, cobrindo quase todo o seu território nacional. As rodovias rurais são as responsáveis por atender volumes de tráfego em longas distâncias e em altas velocidades. E as rodovias urbanas e suburbanas são responsáveis pelo atendimento dos serviços locais, com maiores volumes de tráfego, menores velocidades, com interseções e acessos a propriedades mais próximas. Não existe uma delimitação clara entre vias urbanas e suburbanas e uma rodovia suburbana não é reconhecida como um tipo funcional específico. O importante do ponto de vista da segurança é que muitas rodovias em áreas suburbanas foram projetadas originalmente como rodovias rurais e passaram a operar em condições urbanas (DNIT, 2010).

Diante da necessidade de se relacionar a classificação dos trechos rodoviários de múltiplas faixas do HCM com a realidade brasileira, foram escolhidas as vias arteriais das BR-020, BR-040, BR-060 e BR-070 (Figura 3.1). Essas áreas foram selecionadas por possuírem características de trechos suburbanos e rurais, referentes à composição de tráfego e à geometria das vias, entre outros fatores, semelhantes ao tipo de classificação de vias que o HCM contempla.

A escolha dos segmentos rodoviários para realizar as pesquisas de campo, levou em conta os locais que permitiram uma instalação adequada dos equipamentos para determinar volumes, por suas características geométricas e de extensão em conformidade com o HCM.

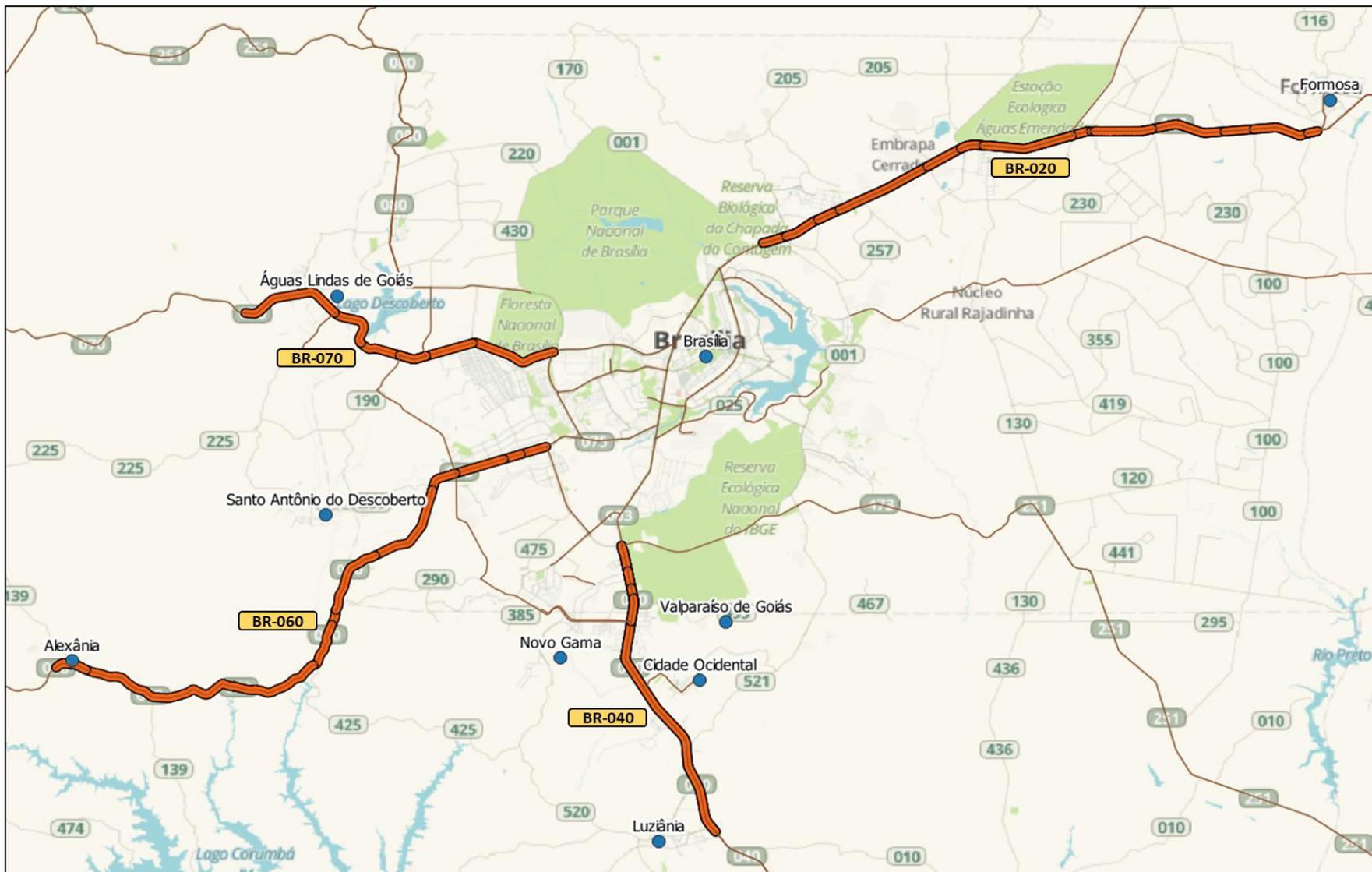


Figura 3.1 – Mapa de vias arteriais no Distrito Federal e no Estado de Goiás: BR-020, BR-040, BR-060 e BR-070

3.1.1 Rodovia BR-020

A BR-020 é uma rodovia federal, com início na cidade de Brasília e término na cidade de Fortaleza (Figura 3.2). A rodovia em questão passa pelo Distrito Federal (DF) e pelos estados de Goiás, Bahia, Piauí e Ceará. O trecho rodoviário de pista dupla inicia no entroncamento da BR-020 com a BR-010, em Brasília e finaliza no entroncamento com a BR-030, na divisa do DF e o estado de Goiás. Os primeiros 33,6 km, que passam pelas áreas urbanas de Sobradinho e de Planaltina, são de jurisdição do Departamento de Estradas de Rodagem do distrito Federal (DER/DF). Já os 24,3 km restantes são de jurisdição Federal e conectam o município de Formosa com o centro de Brasília (SNV, 2019).



Figura 3.2 – Rodovia BR-020

3.1.2 Rodovia BR-040

A BR-040 é uma rodovia federal, que inicia na cidade de Brasília, no entroncamento com a BR-450/251 e termina na cidade de Rio de Janeiro. Essa rodovia passa pelo Distrito Federal e pelos estados de Goiás, Minas Gerais e Rio de Janeiro. O trecho rodoviário de pista dupla inicia no entroncamento da BR-040 com a BR-050/A e finaliza no entroncamento com a BR-050/B, na divisa entre o DF e o estado de Goiás, com uma extensão de 8,2 km. Depois da divisa com o estado de Goiás, a pista dupla continua até o Entro GO-010, no município de Luziânia, com uma extensão de 24,1 Km, totalizando uma extensão de 32,5 km (SNV, 2019).

Na atualidade, a rodovia está sob a jurisdição da concessionária VIA040, encarregada dos serviços de manutenção e recuperação da rede viária (SNV, 2019). Os primeiros quilômetros duplicados conectam o município de Valparaíso de Goiás, Nova Gama, Cidade Ocidental e Luziânia com o centro de Brasília, Figura 3.3.



Figura 3.3 – Rodovia BR-040

3.1.3 Rodovia BR-060

A BR-060 é uma rodovia federal, que inicia na cidade de Brasília e finaliza em Bela Vista/MS, na fronteira com o Paraguai, passando pelo Distrito Federal e pelos estados de Goiás e Mato Grosso do Sul (Figura 3.4). O trecho rodoviário de pista dupla, entre Brasília e Goiânia, foi concedido por leilão ao Consórcio Triunfo Participações e Investimentos (TPI). O trecho dentro do Distrito Federal inicia no entroncamento da BR-060 com a BR-251 e finaliza na divisa do DF com o estado de Goiás, com uma extensão de 31,3 km. Após a divisa com o estado de Goiás, a pista dupla continua até o Entro BR-153, nas proximidades do município de Goiânia, com uma extensão de 139, 4 Km, totalizando uma extensão final de 170,7 km (SNV, 2019).



Figura 3.4 – Rodovia BR-060

Atualmente, o trecho entre Brasília e Goiânia da rodovia BR-040 serve de conexão entre os municípios goianos de Alexânia, Abadiânia, Anápolis, Goianápolis e Goiânia. Dentro do Distrito Federal, a rodovia conecta a área central de Brasília com as cidades satélites de Recanto das Emas I e II (SNV, 2019).

3.1.4 Rodovia BR-070

A BR-070 é uma rodovia federal, que tem como ponto de início a cidade de Brasília e termina no distrito de Corixa, no município de Cáceres/MT, na fronteira com a Bolívia, passando pelo Distrito Federal e pelos estados de Goiás e Mato Grosso (Figura 3.5). O trecho rodoviário de pista dupla inicia no entroncamento da BR-070 com a BR-251 em Brasília e finaliza no entroncamento com a DF-180 na divisa do DF e o estado de Goiás, acumulando uma extensão de 19,8 km. Posteriormente, continua até o final das obras de duplicação nas proximidades do município de Águas Lindas de Goiás até uma extensão de 16 km. Totalizando uma extensão de pista dupla de 35,8 km, de jurisdição federal (SNV, 2019).

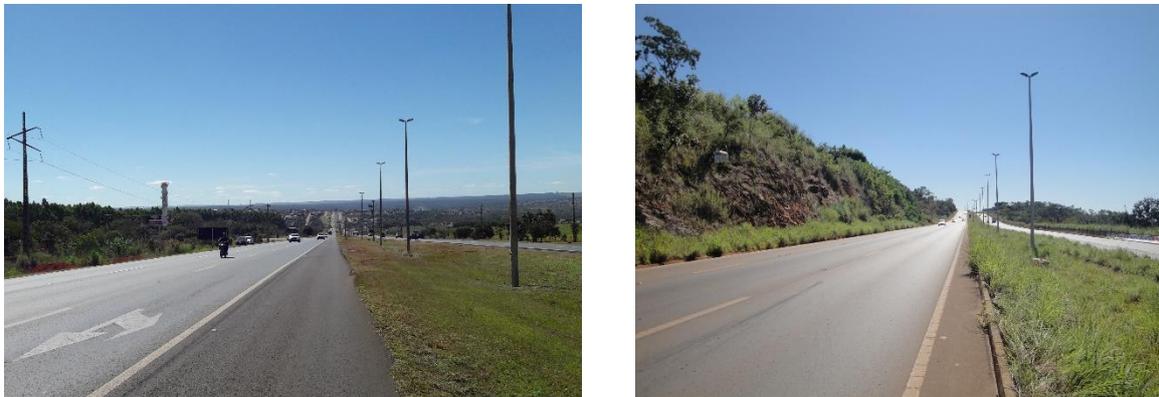


Figura 3.5 – Rodovia BR-070

3.2 ESTUDOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO DE TRÁFEGO

Seguindo as diretrizes do HCM, a pesquisa de campo tem como objetivo caracterizar o fluxo de tráfego de rodovias de múltiplas faixas. Isso demanda a coleta de informações sobre cada segmento de estudo, em função das suas características físicas e da composição da corrente de tráfego, mediante os seguintes estudos:

- levantamento de características geométricas;
- estudo de volumes de trânsito;
- velocidade e tempo de viagem; e
- calibração e validação do simulador.

Posteriormente ao levantamento dessas informações, são projetados os trechos rodoviários de múltiplas faixas no Vissim. Assim, pretende-se, mediante o uso do simulador calibrado,

determinar um conjunto de curvas fluxo-velocidade distinta para rodovias em trechos suburbanos e rurais (Figura 3.6).

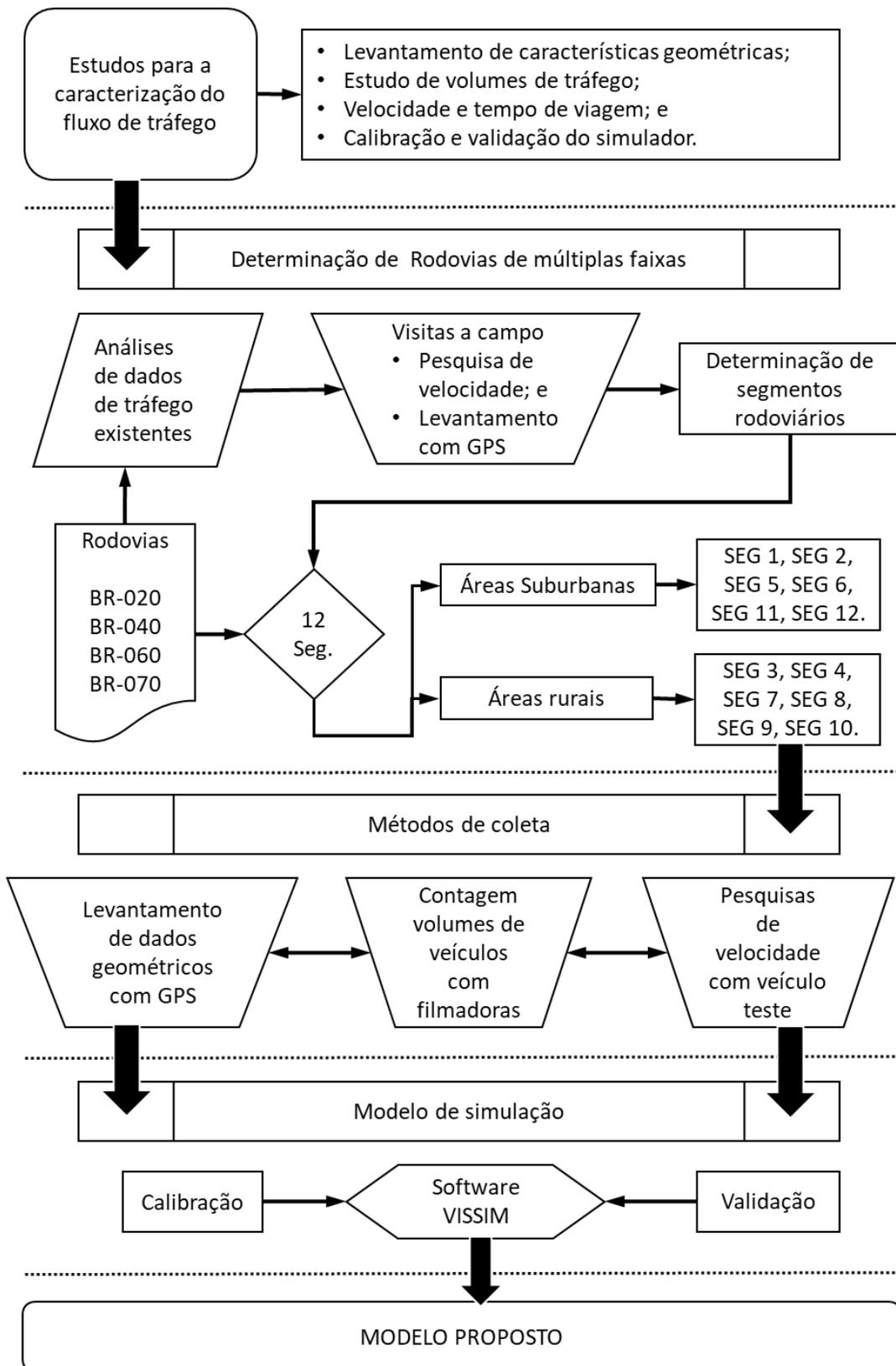


Figura 3.6 – Fluxograma para a caracterização do fluxo de tráfego

3.2.1 Levantamento de dados geométrico com *GPS*

Foram identificados vários segmentos de rodovia a serem estudados mediante visitas programadas. O uso de equipamento de *GPS* serviu para gravar os percursos realizados, além de obter cadastramento de latitude e longitude de cada ponto dos seguintes elementos das rodovias:

- tipo de região limdeira das rodovias (suburbana ou rural);
- número e largura das faixas principais por sentido;
- número de acessos não controlados;
- extensão e declividade das pistas;
- limites de velocidade e sinalização;
- postos policiais, balanças, pontes e túneis; e
- restrições da capacidade.

Todos os locais foram fotografados para montar um banco de dados, utilizando-se como auxílio as imagens aéreas do *Google Maps* e/ou *Google Earth* para armazenar toda a informação levantada.

O uso do aparelho de *GPS* permite determinar o perfil longitudinal e o traçado horizontal da rodovia, coletando informação de latitude e longitude. Com essas informações busca-se caracterizar o tipo de relevo que há na rodovia (ondulado ou plano).

3.2.2 Pesquisa de velocidade com veículo teste

Com o propósito de coletar diferentes faixas de velocidade de percurso dos veículos em cada uma das rodovias, foram realizados estudos de velocidade com veículos testes para circular no meio da corrente de tráfego, registrando-se a velocidade do veículo mediante o emprego de aparelhos *GPS*, que captam informação do veículo durante o tempo de viagem, (Figura 3.7). A metodologia buscou fazer uma pré-avaliação da operação do trânsito de veículos particulares mediante a determinação de velocidades de percursos, realizando-se 5 a 10 viagens por sentido e por tipo de veículo em cada rodovia (DNIT, 2006), totalizando 216 viagens.

As pesquisas de velocidade foram realizadas entre às 06:30-10:30 h para a avaliação dos fluxos matutinos e das 14:00-18:00 h para a avaliação dos fluxos vespertinos em todos os postos pesquisados. Desta forma é possível determinar a variação da velocidade durante o dia, além das velocidades de fluxo livre.

A Figura 3.8 apresenta o perfil de velocidade da BR-020 em função da extensão da via. Para esses tipos de rodovias estudadas é normal observar uma redução da velocidade de percurso nas proximidades de uma área urbana que se prolonga durante toda a sua travessia. Considera-se que este tipo de atraso pode indicar uma parada total do veículo por sinais de controle como semáforos, sinais de pare, rotatórias ou outro tipo de interrupção do fluxo.



Figura 3.7 – Equipamento utilizado: (a) veículo teste; (b) Câmeras de filmagens e rastreador (GPS)

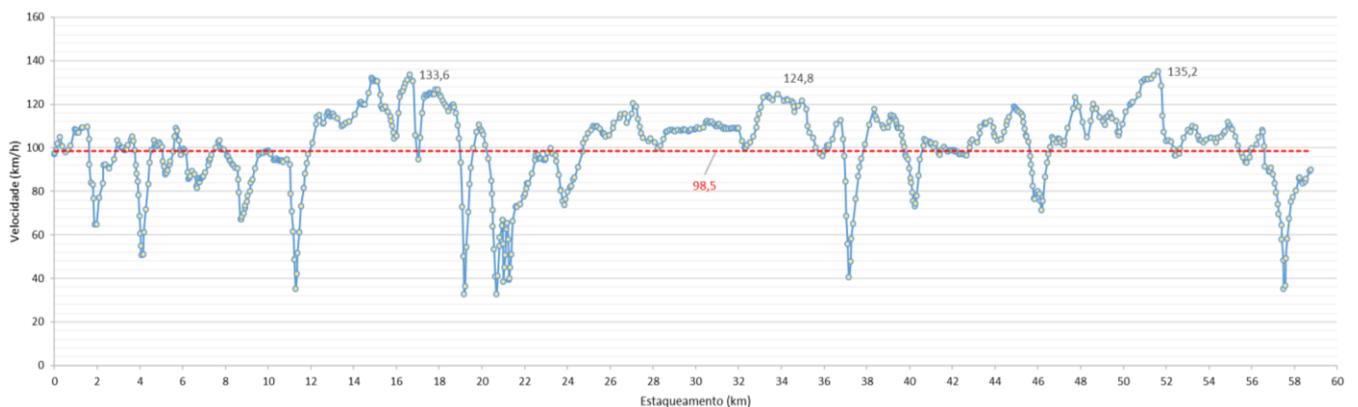


Figura 3.8 – Perfil de velocidade BR-020/DF/GO

3.2.3 Dados de tráfego por meio de filmadoras

O método de obtenção dos dados com filmadora, também usado em outras pesquisas segundo Egami (2006) e Bessa Jr. (2009), consiste em posicionar câmeras de vídeo nas extremidades de segmentos selecionados (Figura 3.9), para posteriormente fazer o processo de pós-edição dos vídeos obtidos em campo. Informações sobre os volumes de tráfego e composição veicular, são obtidas mediante a observação posterior das filmagens, determinadas por intervalos de tempo, usualmente de 5 a 15 minutos (ROMANA, 1994).

Conjuntamente com o método de obtenção de dados por filmadoras foi realizado também uma adaptação do “método das placas” utilizados para pesquisas de origem e destino (ROBERTSON *et al.*, 1994), com a finalidade de rastrear a entrada e saída de veículos de cada segmento. Desta forma, o levantamento da informação foi realizado com dois pesquisadores posicionados em cada ponto de controle com uma câmera de vídeo.

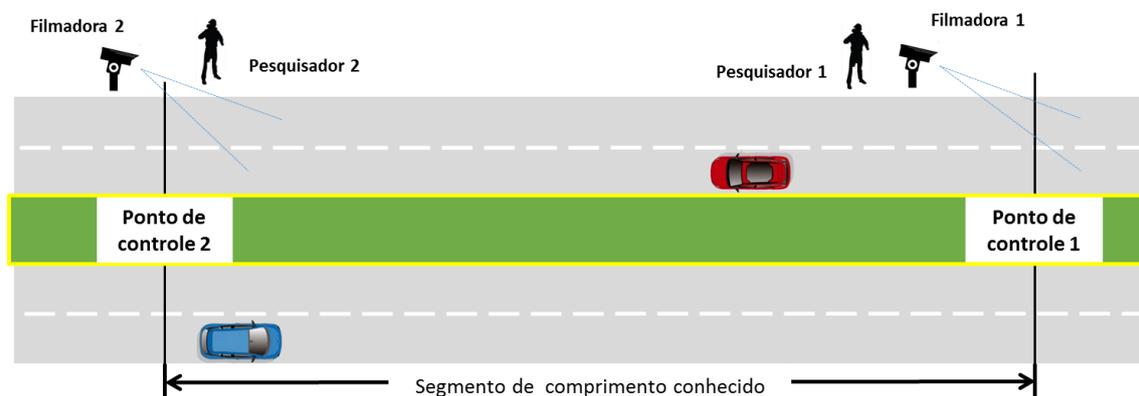


Figura 3.9 – Esquema de posicionamento das câmeras filmadoras e dos pesquisadores durante a coleta de dados

Já em campo, os pesquisadores foram equipados com todos os elementos básicos para a realização da pesquisa, sendo cada um equipado com um *palme* e uma câmera de filmagem (Figura 3.10). Tendo como base a classificação mostrada na Quadro 3.1, os pesquisadores coletam informação das placas de cada veículo que passa pelo segmento em estudo registrando a última letra e os quatro números no exato momento que cruzam a linha do início e fim.



(a)



(b)

Figura 3.10 – Equipamento utilizado: (a) Câmeras de filmagens e (b) *Palme*

Quadro 3.1 – Configuração veicular adotada

COMPOSIÇÕES	SILHETAS (IMAGENS)
Carros de Passeio (P)	
Ônibus (O)	
Caminhão (C)	
Reboque (R)	
Semirreboque (S)	
	

Fonte: adaptado de DNIT (2006).

As coletas de dados foram planejadas para identificar os pontos de observação em cada segmento selecionado, com base em estudos de séries históricas de dados referentes a volume de sensores de tráfego. As series históricas foram utilizadas para determinar horários e dias da pesquisa para coletar as variações do fluxo com as magnitudes desejadas (intermediários e altos) e obter diferentes níveis de serviço.

Os intervalos determinados foram os mesmos utilizados para realizar as pesquisas de velocidade pelo método de carro teste, das 06:30h às 10:30h, para a avaliação dos fluxos matutinos, e das 14:00h às 18:00h, para a avaliação dos fluxos vespertinos em todos os postos pesquisados. É importante ressaltar que as contagens volumétricas foram programadas para ser realizadas em períodos de 4 horas, matutinos e vespertinos, durante dias diferentes para cada segmento.

3.2.4 Dados de tráfego existentes

Levando-se em consideração que as rodovias atualmente se encontram pavimentadas, foram solicitados ao DNIT projetos existentes sobre as rodovias em estudo. Foram consultados projetos existentes disponíveis nos arquivos do DNIT, em sua sede em Brasília, especificamente contratos oriundos das coordenações de desenvolvimentos de projetos (CGDESP/DPP/DNIT) e de planejamento (CGPLAN/DPP/DNIT), para obtermos informações pertinentes a estudos de tráfego e estudos de projetos geométricos.

Os projetos identificados como disponíveis para consulta no DNIT, no período de 2004 a 2017, correspondem às seguintes fontes de estudos:

- Pesquisas Nacionais de Tráfego (PNT);
- Empresa de Planejamento e Logística (EPL);
- Plano Nacional e Controle Eletrônico de Velocidade (PNCV);
- Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT);
- Contratos de Restauração e Manutenção (CREMA); e
- Projeto Executivos.

Os projetos anteriores foram utilizados para obtermos a contagem de tráfego por períodos, classificação dos veículos por número de eixos, medição de velocidade e dados geométricos das vias. Informações que foram necessárias para a caracterização do fluxo de tráfego e determinação de trechos homogêneos de estudo.

3.3 SEGMENTOS DE ESTUDO

A partir da coleta e do tratamento dos dados disponíveis ao público, bem como das visitas ao campo nas rodovias escolhidas para o estudo, foram selecionados segmentos que permitiram produzir dados para a calibração do modelo de fluxo de velocidade.

A metodologia para a caracterização e para a seleção dos segmentos homogêneos foi baseada na montagem de um banco de dados existentes, que indica as fontes de informação, os procedimentos de obtenção e o tratamento dos dados. Em seguida, foi determinado o relevo das rodovias estudadas a partir de cadastros feitos com o equipamento GPS. Posteriormente, a partir dessas informações, com as velocidades coletadas em campo e com as características geométricas, foram selecionados os segmentos que permitiram produzir dados adequados para a calibração do modelo estudado. Como resultado desse processo foram escolhidos 12 segmentos que se mostraram efetivamente adequados nas etapas posteriores do estudo.

3.3.1 Critérios de seleção

Para o estudo foram selecionados doze segmentos rodoviários de pista dupla. Estes trechos estão localizados no interior de Brasília e no estado de Goiás. Compreendem trechos operados sob regime de concessão e sob a administração do DNIT. Na seleção dos trechos estudados foram considerados os seguintes critérios:

- segmentos de rodovias que cruzam uma área rural sem controles ou redutores de velocidade;
- segmentos de rodovias que estejam na transição entre uma área rural e urbana, sem a presença de pardais de controle de velocidade;
- segmentos de rodovias ao longo de uma área desenvolvida, mas sem acessos controlados ou com controladores de tráfego e que tenha uma extensão maior que 3 quilômetros;
- segmentos rodoviários com *FFS* em torno de 60 e 120 km/h.
- segmentos rodoviários que apresentem porcentagem variada de caminhões.

A Tabela 3.1 lista os 12 segmentos selecionados por rodovia, indicando o local e o sentido de cada ponto com coordenadas, bem como a ocupação lindeira da via. Quanto aos segmentos rodoviários, 6 se situam na região rural e 6 na região suburbana, da cidade de Brasília e da cidade satélite de Sobradinho, no Distrito Federal e, no estado de Goiás, nas cidades de Formosa, Águas Lindas, Alexânia e Luziânia.

Os segmentos selecionados têm comprimentos que variam de 3,30 km a 9,59 km. Na definição desses segmentos, buscou-se selecionar diferentes combinações de traçados em planta e perfil. A maior parte dos segmentos possuem um relevo ondulado, típico do interior do Estado de Goiás e do Distrito Federal.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

A coleta das informações foi realizada durante 9 dias de pesquisa, permitindo obter 16 horas e 14 minutos de filmagem, com um total de 66.115 veículos coletados, 216 registros de velocidades de viagem e 36.768 registros de placas, para os 12 segmentos. As datas e os períodos das coletas de dados são mostrados na Tabela 3.2.

O levantamento de contagem de veículos registro taxas de fluxo entre 200 a 2.900 veíc/h, compreendido por taxas de fluxos relativamente baixas nos segmentos rurais e taxas de fluxos elevadas nos segmentos suburbanos, (Figura 3.11). As maiores frequências de dados correspondem a taxas fluxos entre 200 até 500 veíc/h, e a menor a taxas de fluxos superiores a 2.600 veíc/h.

Tabela 3.1 – Segmentos selecionados para o Estudo

Seg.	Sent.	Descrição do Segmento	Entorno	Caraterísticas do Relevo	Km Inicial e Km Final	Ext. (Km)	Coordenadas Iniciais (Graus Decimais)		Coordenadas Finais (Graus Decimais)	
							Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
BR-020/DF										
1	C	Acesso II Sobradinho - Entroncamento DF-230 (Planaltina)	Suburbano	Ondulado	Km 12,46 ao 19,06	6,60	-15.641138	-47.754085	-15.612103	-47.700299
2	D	Entroncamento DF-230 (Planaltina) – Acesso II Sobradinho	Suburbano	Ondulado	km 40,31 ao 46,39	6,08	-15.615168	-47.706455	-15.641777	-47.755958
3	C	Entroncamento DF-110 – Entroncamento DF-100 (Formosa)	Rural	Ondulado	km 46,52 ao 55,98	9,46	-15.582181	-47.453646	-15.583401	-47.366876
4	D	Entroncamento DF-100 (Formosa) – Entroncamento DF-110	Rural	Ondulado	km 2,48 ao 12,07	9,59	-15.583653	-47.365329	-15.581967	-47.453289
BR-040/DF/GO										
5	C	Entroncamento DF-140 (Cidade Ocidental) – Entroncamento GO-010 (Luziânia)	Suburbano	Ondulado	km 24,8 ao 29,48	4,68	-16.181422	-47.928934	-16.221132	-47.915085
6	D	Entroncamento GO-010 (Luziânia) – Entroncamento DF-140 (Cidade Ocidental)	Suburbano	Ondulado	km 2,82 ao 7,5	4,68	-16.221070	-47.915063	-16.181387	-47.928804
BR-060/DF/GO										
7	C	Entroncamento DF-280 – Entroncamento DF-290 (Núcleo rural Ponte alta de Cima)	Rural	Plano	km 18,46 ao 25,96	7,5	-15.971406	-48.186338	-16.003490	-48.245304
8	D	Entroncamento DF-290 (Núcleo rural Ponte alta de Cima) – Entroncamento DF-280	Rural	Plano	km 144,21 ao 151,71	7,5	-16.003539	-48.244967	-15.971469	-48.185878
9	D	Entroncamento GO-425 (Engenho das Lajes) – Entroncamento DF-290	Rural	Ondulado	km 133,24 ao 139,29	6,05	-16.092552	-48.279633	-16.045723	-48.256961
10	C	Serra do Ouro – Entroncamento GO-139 (Alexânia)	Rural	Ondulado	km 26,58 ao 30,10	3,52	-16.102504	-48.455135	-16.095516	-48.486829
BR-070/DF/GO										
11	C	Entroncamento DF-180(B) – Entroncamento GO-547 (Águas Lindas de Goiás)	Suburbano	Ondulado	km 19,28 ao 23,36	4,08	-15.789133	-48.222432	-15.762235	-48.234784
12	D	Entroncamento GO-547 (Águas Lindas de Goiás) – Entroncamento DF-180(B)	Suburbano	Ondulado	km 16,40 ao 19,70	3,30	-15.775607	-48.232734	-15.790171	-48.215045

Tabela 3.2 – Período de coleta de dados

SEGMENTO	RODOVIA	CALIBRAÇÃO		VALIDAÇÃO	
		Data	Período	Data	Período
1	BR-020	04/05/2017	06:30 - 10:30	11/05/2017	14:00 - 17:45
2	BR-020	04/05/2017	07:15 - 10:45	11/05/2017	14:00 - 17:45
3	BR-020	18/05/2017	06:30 - 10:30	18/05/2017	12:45 - 16:45
4	BR-020	18/05/2017	06:30 - 10:30	18/05/2017	12:00 - 16:00
5	BR-040	04/05/2017	14:30 - 17:15	11/05/2017	07:00 - 11:00
6	BR-040	04/05/2017	14:45 - 17:45	11/05/2017	07:00 - 11:00
7	BR-060	02/05/2017	07:00 - 11:00	25/05/2017	12:00 - 16:00
8	BR-060	02/05/2017	07:15 - 11:15	25/05/2017	13:30 - 17:30
9	BR-060	02/05/2017	07:45 - 10:30	25/05/2017	13:30 - 17:30
10	BR-060	02/05/2017	08:30 - 11:00	25/05/2017	12:00 - 15:45
11	BR-070	10/05/2017	06:30 - 10:30	15/05/2017	14:30 - 17:45
12	BR-070	10/05/2017	06:45 - 10:45	15/05/2017	14:30 - 17:45

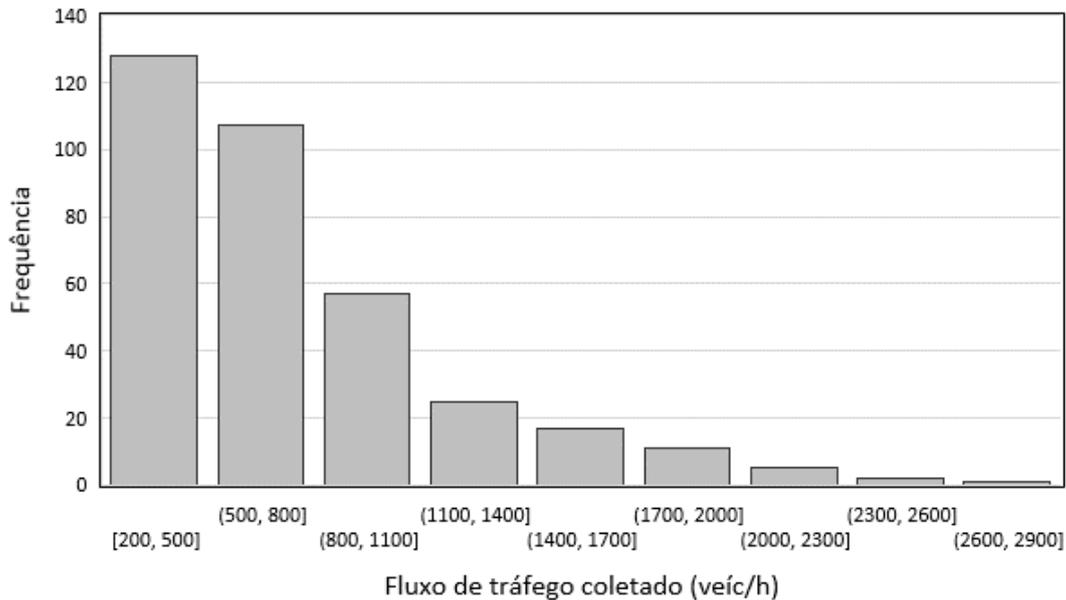


Figura 3.11 – Taxas de fluxo de tráfego coletados nos 12 segmentos de estudo

As informações de velocidades coletadas pelo método do veículo teste, registraram valores mínimas de 31 km/h e máximas de 141 km/h, apresentando maiores frequências de dados de velocidades entre 75 e 86 km/h (Figura 3.12). Demonstra que a maioria das velocidades de viagem são muito próximas às velocidades regulamentadas para este tipo de rodovias.

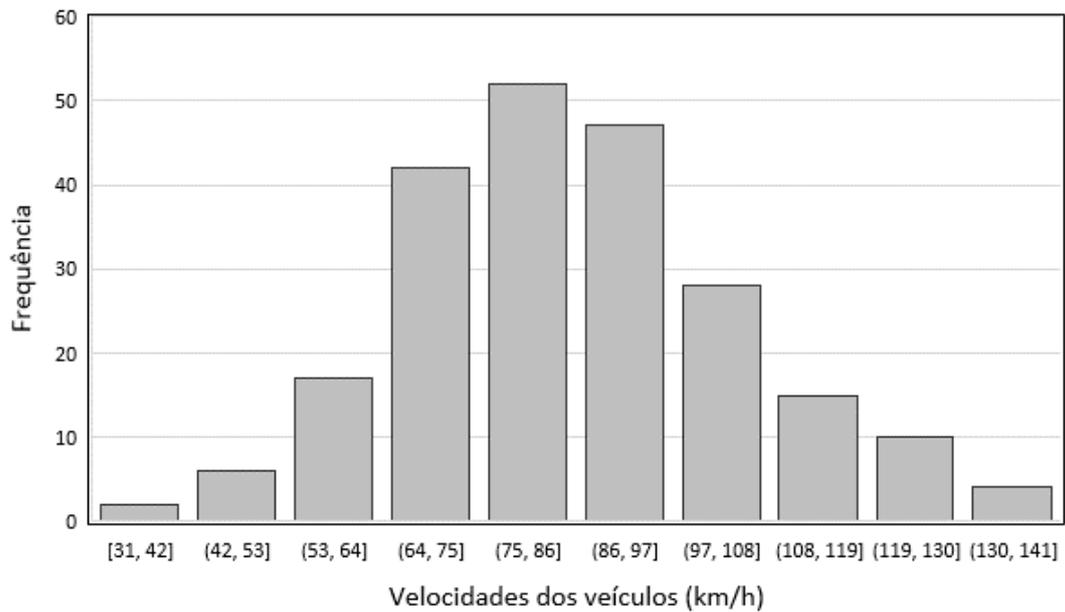


Figura 3.12 – Velocidades de viagem coletadas nos 12 segmentos pelo método do veículo teste

A informação das *palmes* serviram para rastrear o instante em que cada veículo passou pelo ponto de entrada ou saída de cada segmento e permitiu determinar a velocidade de viagem de 3.631 veículos, calculada por meio da distância conhecida entre os dois locais e o intervalo de tempo de passagem. A amostra caracteriza-se por ter vários intervalos de velocidades com um maior número de registros, apontando velocidades de viagem entre 20 km/h e superiores a 150 km/h, (Figura 3.13).

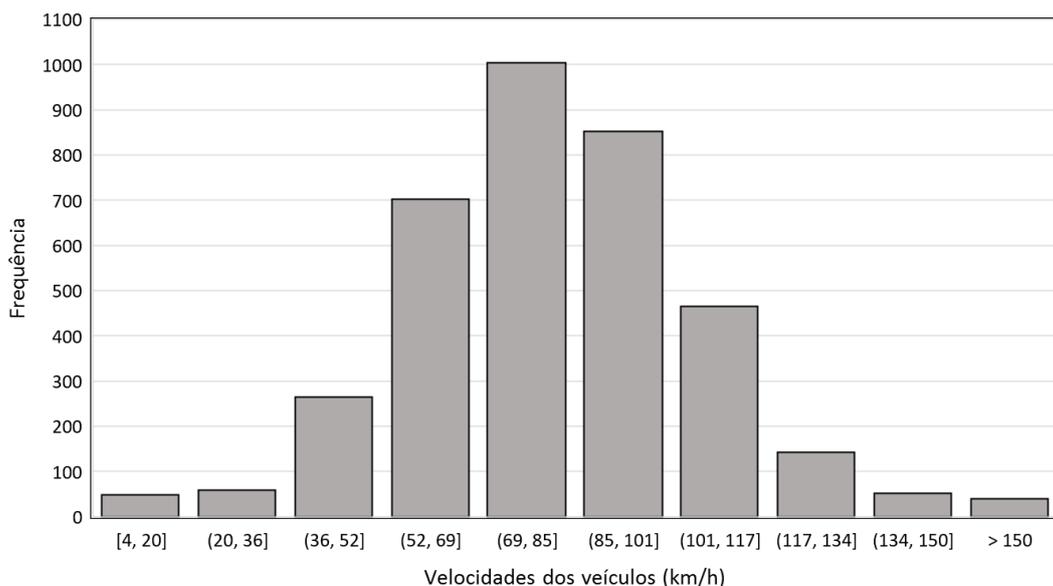


Figura 3.13 – Velocidades de viagem coletadas nos 12 segmentos pelo método das placas

Relacionando os dados coletados em campo com o tipo de entorno que existe em cada rodovia, pode-se estabelecer que nos segmentos suburbanos, durante as 8 horas de pesquisa não se registram volumes com taxas de fluxo menores a 200 veíc/h/faixa e sim registros próximos a 1.200 veíc/h/faixa. O contrário, ocorreu nos segmentos rurais onde a maior frequência de taxas de volumes foi de 200 e 400 veíc/h/faixa, (Figura 3.14).

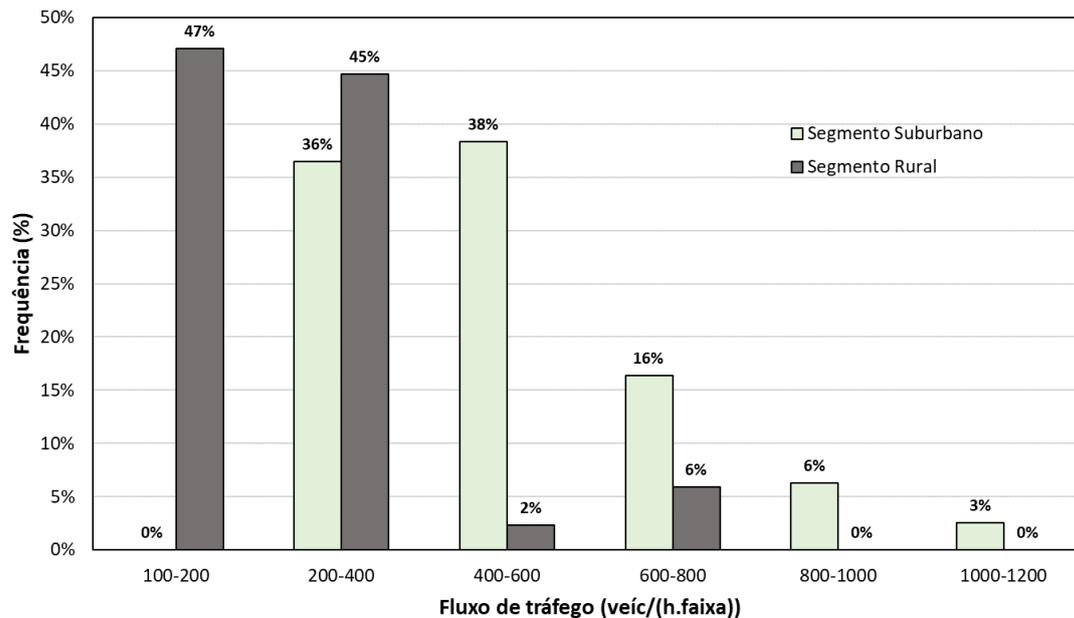


Figura 3.14 – Taxas de fluxo nos segmentos suburbanos e rurais

Se relacionar o tipo de entorno de cada segmento com a frequência das velocidades dos veículos, pode-se afirmar que os segmentos rodoviários rurais desenvolvem maiores velocidades de viagem que os segmentos suburbanos, atingindo um máximo de até 150 km/h, registrando uma maior frequência entre 90 e 110 km/h. Contrariamente, os segmentos suburbanos caracterizam-se por registrar velocidades de viagem entre 70 e 90 km/h com baixa frequência para velocidades maiores que 110 km/h, (Figura 3.15).

Relacionando às variáveis de fluxos e velocidade segundo o entorno do segmento, pode se demonstrar que as baixas taxas de fluxos dos segmentos rurais permitem desenvolver elevadas velocidades com maior variação. Essa variação nos segmentos suburbanos é restringida pelas maiores taxas de fluxos, como se pode observar na Figura 3.16, com pontos mais dispersos nos segmentos suburbanos e menos dispersos nos segmentos rurais.

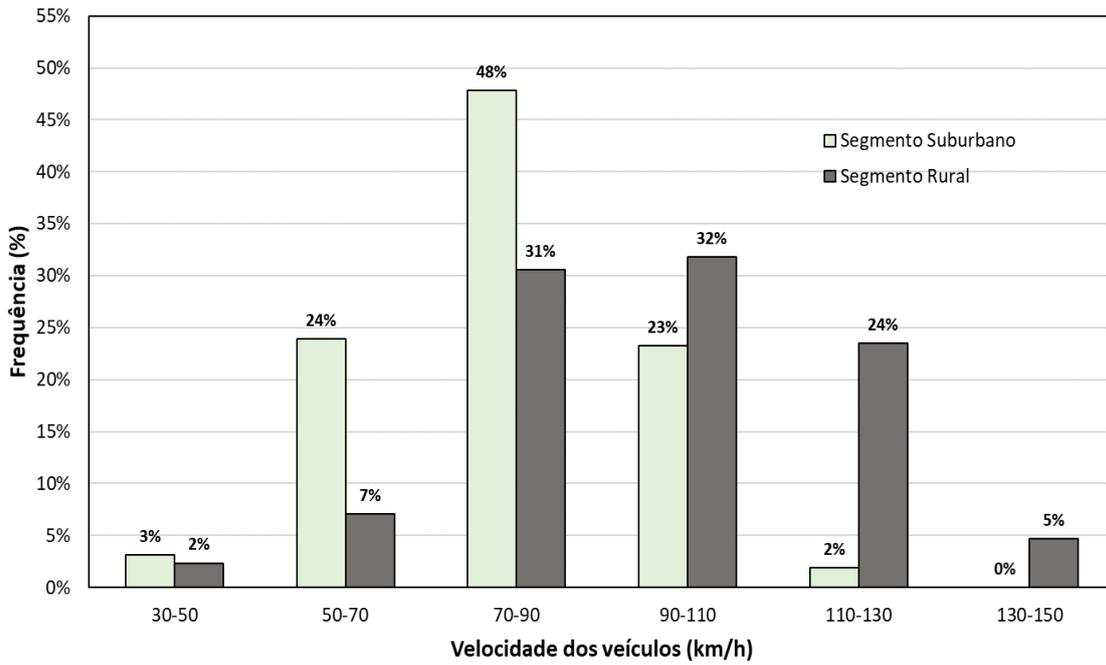


Figura 3.15 – Velocidades dos veículos nos segmentos suburbanos e rurais

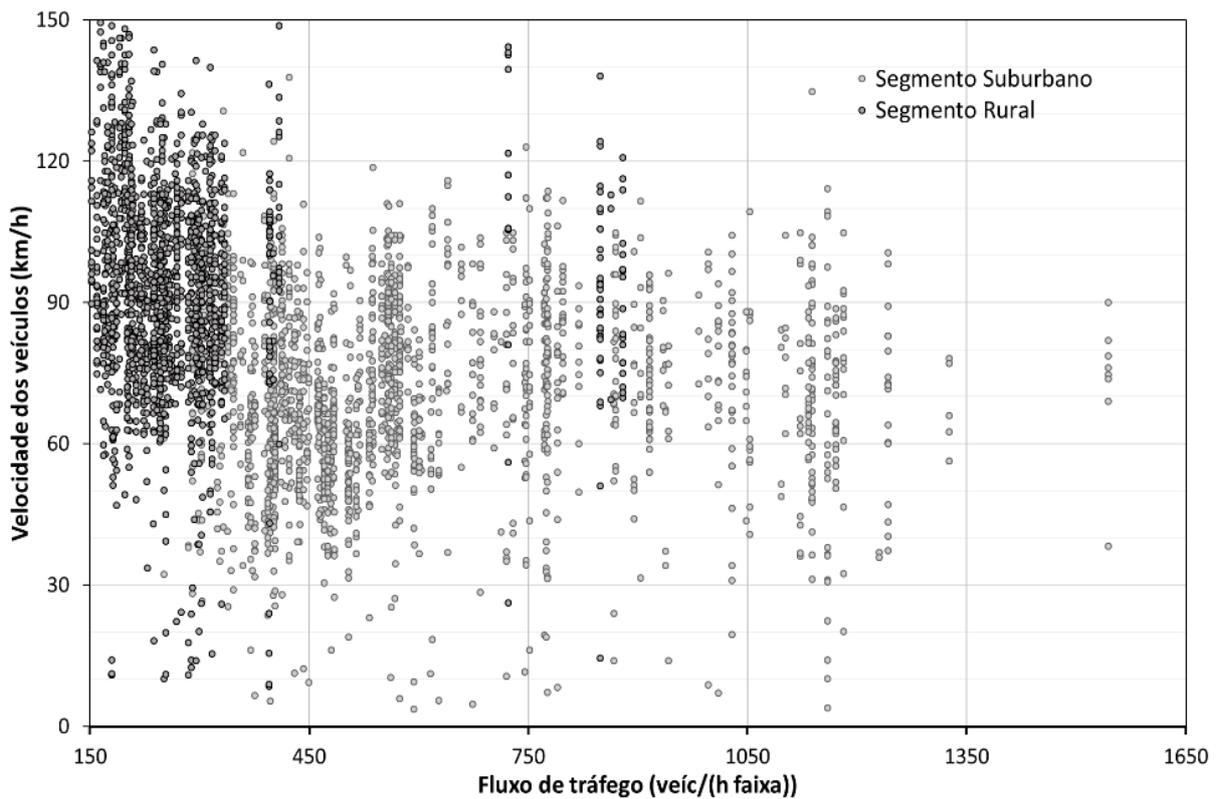


Figura 3.16 – Relação das velocidades dos veículos com o fluxo de tráfego

3.4.1 Rodovia BR-020, Segmentos 1 a 4

O volume total de veículos coletados na BR-020, determinada nos segmentos 1, 2, 3, e 4 (Figura 3.17), foi de 26.195 veículos, que foram agrupados em dois grupos: dados para calibração e dados para validação do modelo 12.926 e 13.269 veículos, respectivamente.

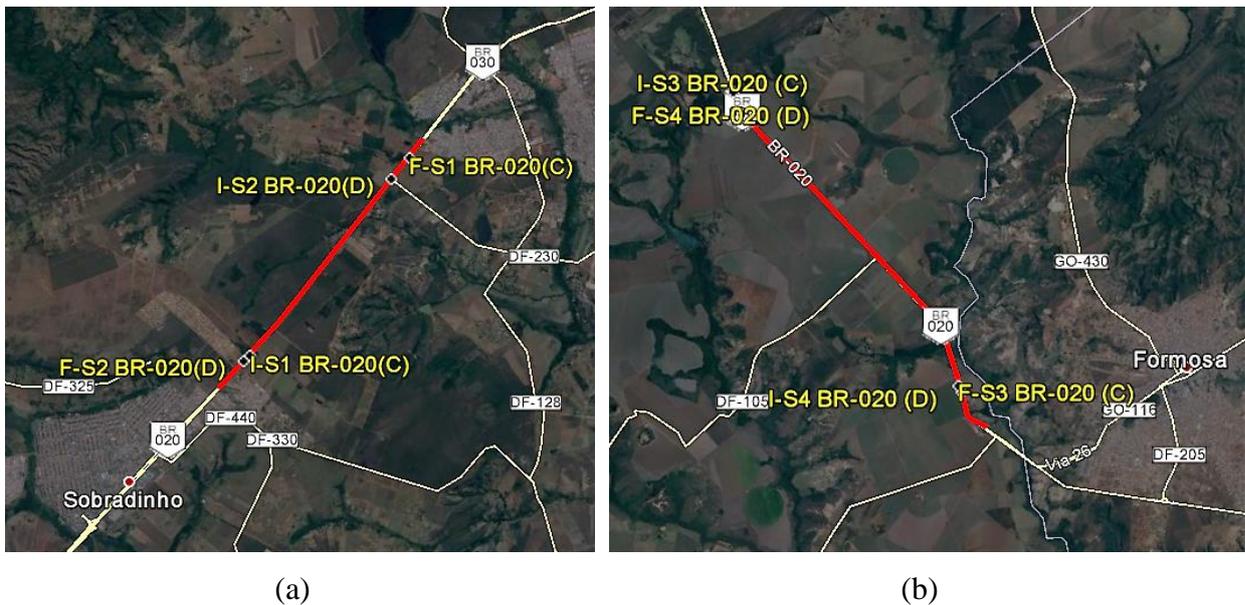


Figura 3.17 – Localização dos segmentos da BR-020: (a) segmento 1 e 2, (b) segmento 3 e 4

A Figura 3.18 apresenta a distribuição média dos veículos observados na BR-020 dividido em duas categorias: carros de passeio e veículos pesados (ônibus, caminhões, reboques e semirreboques). Com esses valores pode-se observar que em média, 86% de veículos correspondem a carros de passeio e 14% a veículos pesados.

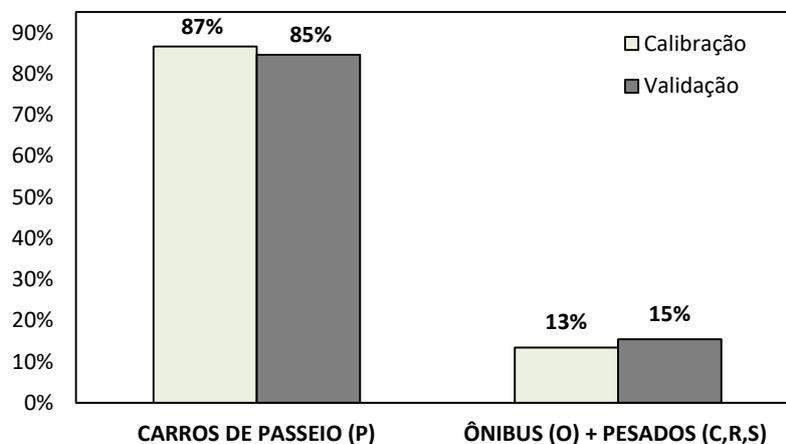


Figura 3.18 – Composição do tráfego na BR-020

Nos quatro segmentos da rodovia BR-020, a velocidade média de viagem observada foi de 80 km/h, onde a máxima foi de 117 km/h (para carros de passeio) e a mínima foi de 53 km/h (para semirreboques). A Figura 3.19 apresenta a média das velocidades de viagem da BR-020 em cinco categorias de veículos: carros de passeio, caminhões, ônibus, reboques e semirreboques, que foram coletadas pelo método do veículo teste a partir dos dados do tempo de percurso e a extensão do segmento.

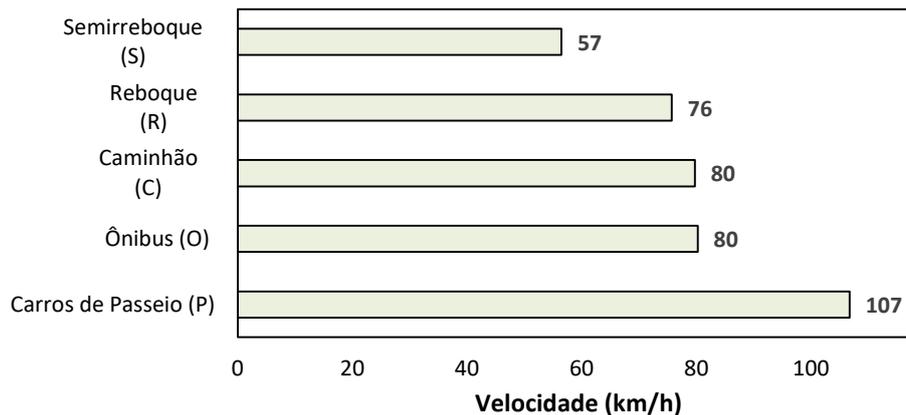


Figura 3.19 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-020

3.4.2 Rodovia BR-040, Segmentos 5 e 6

O volume total de veículos coletados na BR-040, formada pelos segmentos 5 e 6 (Figura 3.20), foi de 9.785 veículos, os quais foram agrupados em 3.874 dados para calibração e 5.911 dados para validação do modelo.



Figura 3.20 – Localização dos segmentos da BR-040, segmentos 5 e 6

A Figura 3.21 apresenta a distribuição média dos veículos observados na BR-040 dividido em duas categorias: carros de passeio e veículos pesados. Com esses valores pode-se observar que em média o 77% de veículos correspondem a carros de passeio e o 23% a veículos pesados.

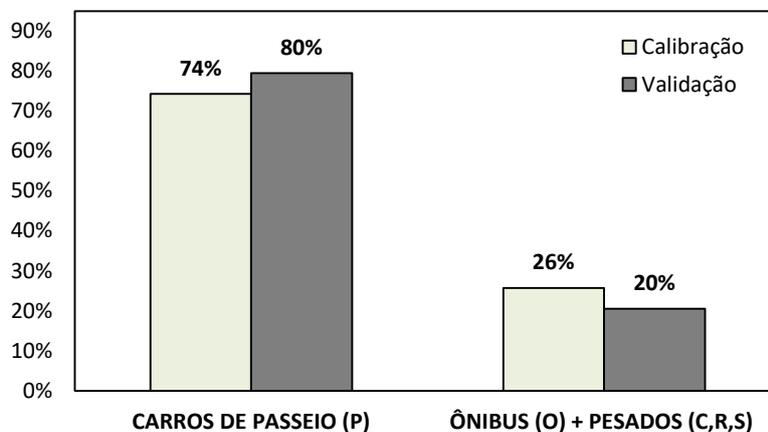


Figura 3.21 – Composição do tráfego na BR-040

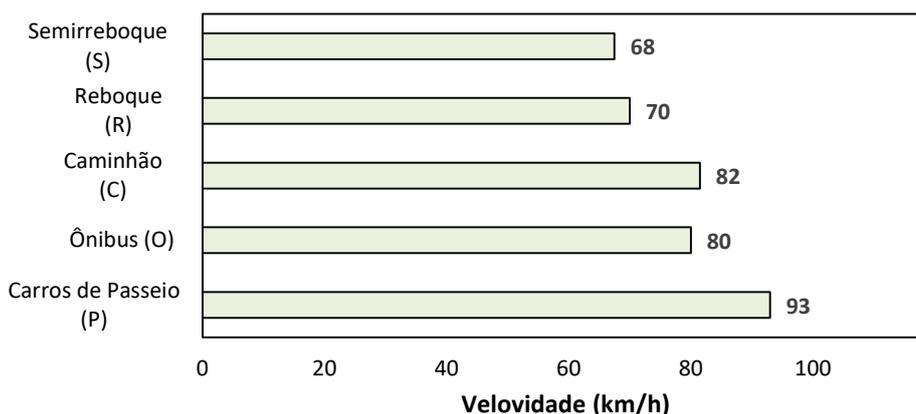


Figura 3.22 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-040

Nos segmentos da rodovia BR-040, a velocidade média de viagem observada foi de 78 km/h, sendo que a máxima foi de 96 km/h (para carros de passeio) e a mínima foi de 65 km/h (para semirreboques). A Figura 3.22 apresenta a média das velocidades de viagem da BR-040 em cinco categorias de veículos: carros de passeio, caminhões, ônibus, reboques e semirreboques, as mesmas foram coletadas pelo método do veículo teste a partir dos dados do tempo de percurso e a extensão do segmento.

3.4.3 Rodovia BR-060, Segmentos 7 a 10

O volume total de veículos coletados na BR-060, composta pelos segmentos 7, 8, 9, e 10 (Figura 3.23), foi de 14.614 veículos, os quais foram agrupados em dois grupos: 6.695 dados para calibração e 7.919 dados para validação do modelo.

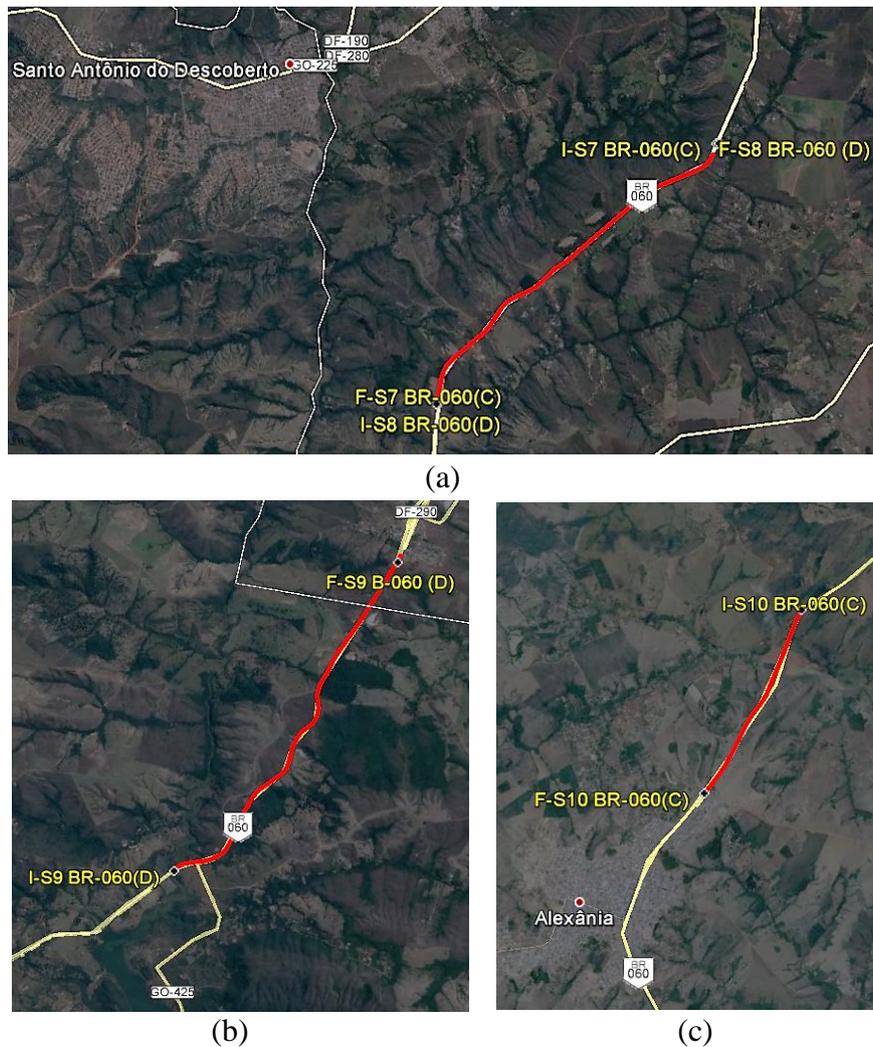


Figura 3.23 – Localização dos segmentos da BR-060: (a) segmento 7 e 8, (b) segmento 9 e (c) segmento 10

A Figura 3.24 apresenta a distribuição média dos veículos observados na BR-060 dividida em duas categorias; carros de passeio e veículos pesados. Com esses valores pode-se observar que em média o 80% de veículos correspondem a carros de passeio e o 20% a veículos pesados.

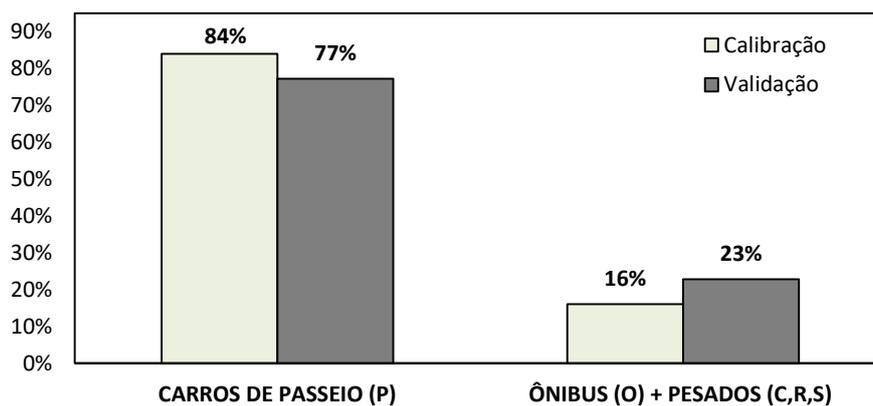


Figura 3.24 – Composição do tráfego na BR-060

Nos quatros segmentos da rodovia BR-060, a velocidade média de viagem observada foi de 91 km/h, sendo 121 km/h para carros de passeio e 53 km/h para semirreboques. A Figura 3.25 apresenta a média das velocidades de viagem da BR-060 em cinco categorias de veículos: carros de passeio, caminhões, ônibus, reboques e semirreboques, elas foram coletadas pelo método do veículo teste a partir dos dados do tempo de percurso e a extensão do segmento

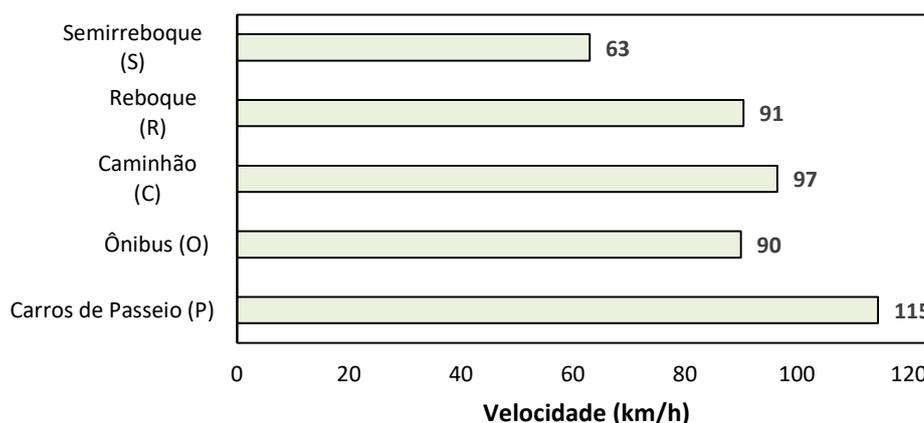


Figura 3.25 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-060

3.4.4 Rodovia BR-070, Segmentos 11 e 12

O volume total de veículos coletados na BR-070, composta pelos segmentos 11 e 12 (Figura 3.26), foi de 15.521 veículos, os quais foram agrupados em dois grupos: dados para calibração e dados para validação do modelo 8.912 e 6.609 veículos respectivamente.



Figura 3.26 – Localização dos segmentos da BR-070, segmentos 11 e 12

A Figura 3.27 apresenta a distribuição média dos veículos observados na BR-070 dividida em duas categorias; carros de passeio e veículos pesados (ônibus, caminhões, reboques e semirreboques). Com esses valores pode-se observar que em média o 93% de veículos correspondem a carros de passeio e o 7% a veículos pesados.

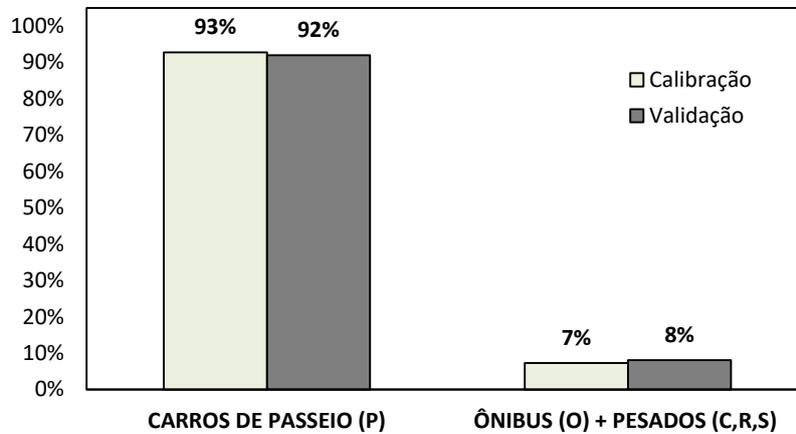


Figura 3.27 – Composição do tráfego na BR-070

Em ambos os segmentos da rodovia BR-070, a velocidade média de viagem observada foi de 61 km/h, onde 99 km/h foi para carros de passeio e 55 km/h para semirreboques. A Figura 3.28 apresenta a média das velocidades de viagem da BR-070 em cinco categorias de veículos sendo que as mesmas foram coletadas pelo método do veículo teste a partir dos dados do tempo de percurso e a extensão do segmento.

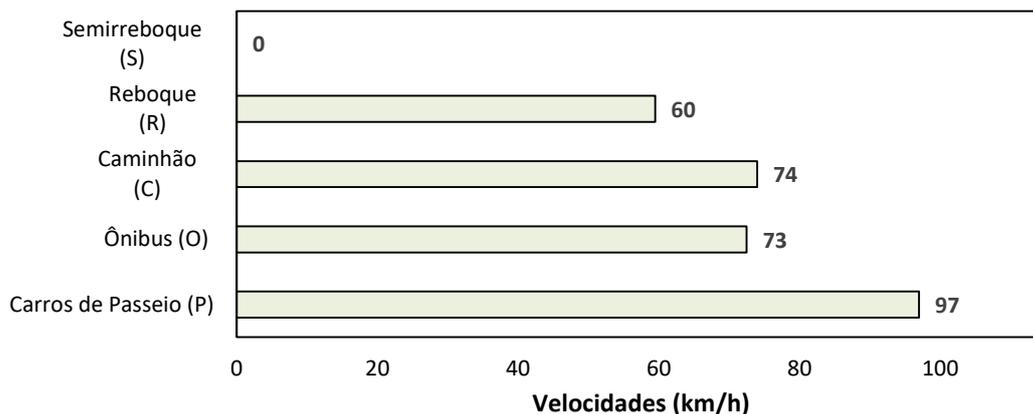


Figura 3.28 – Velocidades médias observadas pelo veículo teste na rodovia BR-070

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das pesquisas em campo, consegue-se demonstrar que os segmentos suburbanos se caracterizam por terem maiores taxas de fluxos que reduzem a possibilidade de desenvolver velocidades maiores, que fazem com que o comportamento dos usuários seja diferente num entorno rural.

Um fator que não foi incluído no procedimento do HCM foi a previsão da presença de paradas de ônibus nos segmentos das rodovias rurais e suburbanas. Sendo que os segmentos suburbanos com mais paradas de ônibus, tinham uma velocidade média de fluxo mais baixa que os segmentos rurais sem paradas de ônibus.

Para as rodovias rurais foi possível registrar velocidades de percurso máximas de 150 km/h, o que pode indicar que em vias sob boas condições e moderados fluxos de tráfego é possível obter velocidades médias de fluxo livre equivalente ao que o HCM estabelece.

Igualmente, conseguiu-se obter distribuições maiores a 25% de veículos pesados, indicando que a composição veicular do Brasil é diferente à dos Estados Unidos. Durante 8 horas de pesquisa de campo em um dos trechos rodoviários investigados foram registrados 26% de veículos pesados. Essa porcentagem que pode ser ainda maior uma vez que, em muitos trechos, o fluxo de veículos pesados aumenta nos períodos noturnos.

Com relação a metodologia de coleta de velocidade média de viagem, não se tem a certeza que as velocidades dos veículos de passagem em cada segmento são influenciadas pelos veículos que entram ou saem do segmento, o que indica que pode existir uma diferença na técnica de medição de campo que recomenda o HCM.

4 MODELO DE SIMULAÇÃO

4.1 SIMULADORES DE TRÁFEGO

Os simuladores são ferramentas bastante úteis para os engenheiros de tráfego. Trata-se de recursos populares para a modelagem e a análise de vários sistemas de transportes, permitindo analisar o desempenho dos sistemas rodoviários existentes, bem como prever os efeitos de potenciais mudanças operacionais ou de infraestrutura. Segundo May (1990), a simulação do tráfego veicular corresponde numa técnica numérica para representar sistemas viários através de uma interface computacional, cujo principal objetivo é replicar a sequência de eventos do sistema estudado, ao longo do tempo.

Um dos principais benefícios da simulação de tráfego é evitar dispendiosos testes em campo, uma vez que permite criar cenários capazes de representar diferentes situações de tráfego, considerando diferentes horários do dia, mudanças de tempo e de volume. Dessa forma, é possível replicar uma sequência de eventos hipotéticos no sistema estudado antes de uma intervenção no tráfego (PORTUGAL, 2005).

A capacidade dos softwares de simulação para modelar os complexos processos de interações nos sistemas de transporte, permitiram cobrir a incapacidade das ferramentas analíticas em modelar e analisar esse tipo de sistemas, o que levou sua crescente popularidade e desenvolvimento de uma ampla gama de software de simulação de tráfego (BARCELÓ, 2011).

Segundo Jayakrishnan *et al.* (2002), os modelos de simulação de tráfego podem ser classificados em três grupos: macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos. Essa organização é definida principalmente pela maneira como os modelos representam o fluxo de tráfego.

Os modelos macroscópicos utilizam uma unidade de análise abrangente e não consideram as análises individuais dos veículos. Agregam valores para zonas geográficas ou grupo de veículos, considerando apenas as características médias das correntes de tráfego. Esses modelos são estáticos, determinísticos e avaliam um único estado da rede, considerando variáveis agregadas como densidade (média), fluxo (médio) e velocidade (média) (ARIOTTI *et al.*, 2004).

Os modelos mesoscópicos têm uma unidade de detalhamento intermediário de análise, sendo capazes de descrever os movimentos dos veículos individuais em termos de relações agregadas de forma mais detalhada que os modelos macroscópicos. Isso permite que os veículos sejam agrupados em pelotões de tráfego, mediante a definição de regras comportamentais para veículos individuais como, por exemplo, modelos de distribuição de *headway* e modelos de *cluster* (FEMKE *et al.*, 2014).

Os modelos Microscópicos têm uma unidade pequena de análise, capaz de simular o movimento de veículos individuais que viajam dentro de uma rede rodoviária através da replicação precisa do comportamento do motorista (PAUL & GUDMUNDUR, 2004). Esses modelos incluem algoritmos e regras que descrevem como os veículos se movimentam e interagem, incluindo aceleração, desaceleração, mudança de faixa e manobras de ultrapassagem.

Nos últimos anos, os modelos microscópicos têm sido cada vez mais utilizados, tornando-se uma ferramenta de análise indispensável para analistas de transporte (JEANNOTTE *et al.*, 2004). Como os modelos microscópicos predizem o tráfego com mais detalhes, registrando as trajetórias de cada veículo, são adequados para seções de vias expressas (LEE & KIM, 2004), locais isolados como interseções em nível e desnível (PAUL & GUDMUNDUR, 2004), transporte de cidades ou regiões (SMITH & ADEL, 2006), sistemas de controle de sinais (LIU *et al.*, 2001) e aplicações similares, onde é necessário prever o comportamento de veículos.

4.2 ESCOLHA DO SIMULADOR

Atualmente, todos os modelos de simulação fornecem interfaces com os usuários, permitindo representar as situações reais das rodovias mediante gráficos e animações computacionais, oferecendo uma ampla variedade de formatos de dados para exibir resultados de análise. A diferença entre os *softwares* se dá essencialmente quanto ao número de pacotes integrados, os quais podem considerar diferentes modos de tráfego, incluindo modelos de simulação de pedestres, além de permitir a interface de aplicativos com o uso de linguagens de programação. O mais importante, portanto, é a sua facilidade de acesso, devido à possibilidade de utilização de *softwares* comerciais por meio de licenças pagas ou livres.

Recentemente, pesquisas como as de Nicholas *et al.*, (2019) demonstram que os modelos de micros-simulação bem calibrados têm se mostrado promissores como uma ferramenta de análise de tráfego em rodovias, amplamente empregadas para avaliar estratégias dinâmicas de gerenciamento de tráfego, aplicações de sistemas de transporte inteligentes e diversas opções de desenho geométrico.

Segundo Mehdi & Afshin (2019) os softwares mais conhecidos que funcionam com base em um conjunto de modelos microscópicos de tráfego são AIMSUM, VISSIM, PARAMICS, CORSIM e o SUMO. Eles atraem grande interesse dos pesquisadores de tráfego porque os modelos de seguimento de carros e de mudanças de faixas são considerados os mais importantes desses modelos.

Durante a revisão bibliográfica de *softwares*, percebeu-se uma considerável quantidade de trabalhos que constataram a eficiência e a funcionalidade do Vissim. Segundo Ratrout & Rahman (2008) e Gao (2008), o Vissim se destaca por sua capacidade de modelar de forma simples e satisfatória os veículos individuais. Isso permite modelar veículos de passageiros e caminhões típicos em rodovias e vias arteriais, além de diferentes modos de transporte, como ônibus, VLT (veículo leve sobre trilhos), trens urbanos e de carga (MOEN *et al.*, 2000).

Entre as qualidades do modelo Vissim apontadas por alguns autores Moen *et al.* (2000), Bloomberg & Dale (2000), FHA (2003), destaca-se o modelo para representação dos movimentos de veículos pelo algoritmo de “*car-following psicofísico*”, tendo em vista a sua praticidade na elaboração de redes a modelar (*link* e *nodos*), sua flexibilidade na definição de parâmetros para mudança de faixas (“*lane-change*”), aceitação de *gaps* (“*gap-acceptance*”), decisão de rotas (“*route decision*”) e sua facilidade para apresentação de relatórios com os resultados das simulações.

Por outro lado, o *Highway Capacity Manual 2000* (TRB, 2000) sugere alguns critérios para a escolha de simuladores de tráfego para diversas aplicações, em função de: (a) tamanho da rede que permite modelar; (b) capacidade de representação do modelo para os movimentos dos veículos; (c) representação de diferentes tipos de veículos com suas características e performance; (d) funcionalidade para representar os tipos de controles de tráfego e operacionalidade dos veículos da rede; (e) tipos de resultados de saída; (f) quantidade e

facilidade de coleta de dados de entrada; (g) facilidade de ferramentas para o usuário utilizar; e (h) disponibilidade comercial e recursos computacionais para a utilização do modelo.

Por fim, em conformidade com as recomendações do *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000), relativas a critérios para a escolha de simuladores de tráfego e seu potencial para a realização de simulações, além do algoritmo específico para tráfego rodoviário, o Vissim (*Verkehr In Städten-SIMmulation*) versão 11 foi escolhido para ser usado como *software* de simulação de tráfego neste estudo. Outro fator importante que contribuiu para esta escolha é que a Universidade de Brasília (UNB) possui sua licença de operação, ao mesmo tempo que foi disponibilizada uma versão acadêmica gratuita pela empresa alemã que desenvolve e comercializa, a *Planung Transport Verkehr* (PTV, 2017).

4.3 O SOFTWARE VISSIM

O *software* Vissim, de origem alemã é um modelo de simulação microscópica que permite obter informações do estado das variáveis comportamentais para cada veículo, com base em três modelos matemáticos. O primeiro está relacionado à representação dos aspectos técnicos e físicos dos transportes, o segundo está relacionado à geração da demanda, considerando pessoas e veículos na rede. Por fim, o terceiro está relacionado a semáforos e regras de preferência (PTV, 2017).

Em vez de usar velocidades constantes e modelos determinísticos do veículo, o simulador Vissim usa o modelo de comportamento do motorista psicofísico desenvolvido por Wiedemann (1974), que está mais próximo do comportamento real em campo. O conceito básico deste modelo é que o motorista de um veículo em movimento mais rápido começa a desacelerar uma vez que atinge seu limite de percepção individual, em relação a um veículo em movimento mais lento. Dado que ele não pode determinar exatamente a velocidade desse veículo, sua velocidade diminuirá abaixo da velocidade daquele veículo, até que ele novamente comece a acelerar logo que atingir outro limite de percepção.

Segundo Leutzbach (1988), os modelos psicofísicos utilizam limiares de ação a partir dos quais o motorista muda o seu comportamento. Os condutores são capazes de reagir a mudanças de distância ou de velocidade somente quando estes limiares são atingidos.

O Vissim pode fornecer parâmetros em tempo real como velocidade, aceleração, desaceleração, tempos de reação física e padrões fisiológicos do comportamento de cada condutor, por meio de limites comportamentais (Figura 4.1). Este *software* funciona com base em matemática probabilística, considerando o movimento e as propriedades dinâmicas e desta forma é capaz de representar a localização de cada veículo em movimento no tráfego da rede simulada.

A velocidade do veículo é representada por taxas de aceleração que são controladas por limites comportamentais: *SDV*, *SDX*, *OPDV*, *CLDV*, *ABX* e *AX*. Eles simulam a manipulação do acelerador pelo condutor, representando a velocidade diferente de zero em todos os momentos. O Vissim permite modular a desaceleração, com a finalidade de evitar colisões quando a distância de separação do veículo da frente é pequena. Também permite modelar a aceleração máxima do veículo para atingir a sua velocidade desejada, quando a viagem não é influenciada pelo tráfego circundante, o que ocorre quando o veículo está acima de todos os limites, conforme representado no diagrama constante na Figura 4.1.

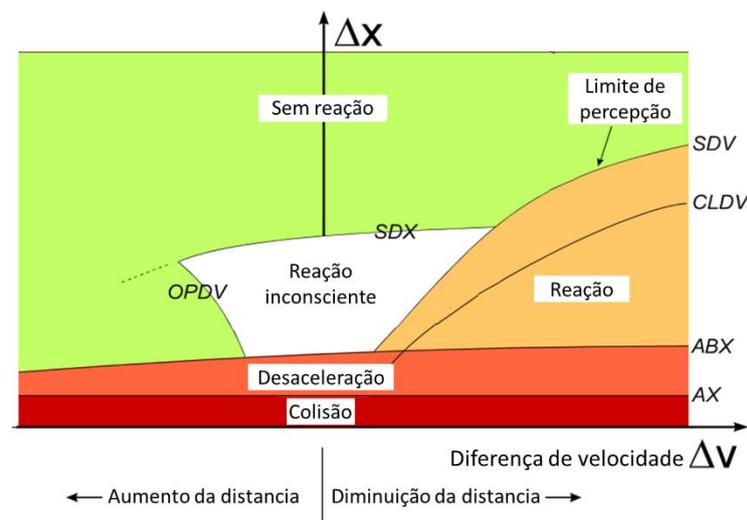


Figura 4.1 – Lógica de seguimento de veículo (*car-following*)
 Fonte: adaptado de Wiedemann (1974).

O modelo permite representar uma rodovia de uma faixa (ou múltiplas faixas) com uma direção de fluxo específica, replicando as características de comportamento individual dos motoristas e simulando a forma como reagem aos veículos da frente, bem como os veículos vizinhos que viajam nas faixas adjacentes. No caso de mudança de faixa livre, o modelo avalia a distância de segurança desejada do veículo que se aproxima da nova faixa. Essa distância de segurança depende da sua velocidade e da velocidade do veículo que deseja mudar para essa faixa.

O Vissim simula o tráfego mediante o movimento de “unidades veículo-motorista” ao longo de uma rede. Cada motorista com suas características específicas de comportamento é atribuído a um veículo específico. Como consequência, os comportamentos de condução correspondem às capacidades técnicas de seu veículo. Os atributos de caracterização de cada unidade veículo-motorista podem ser discriminados em três categorias:

- especificação técnica do veículo como, por exemplo, comprimento, velocidade máxima, aceleração potencial, posição potencial na rede, velocidade efetiva e aceleração;
- comportamento de unidades veículo-motoristas como, por exemplo, limites de sensibilidade psicofísica do motorista (capacidade de predição, agressividade), memória do motorista, aceleração baseada na velocidade atual e a velocidade desejada pelo motorista; e
- interdependência das unidades veículo-motoristas como, por exemplo: referência para lidar e seguir veículos nas faixas de viagem próprias e adjacentes; referência da faixa atual e a seguinte interseção; e referências ao semáforo seguinte.

Para representar a infraestrutura viária, o simulador utiliza funções de aceleração e desaceleração para considerar os diferentes comportamentos dos motoristas. No caso dos caminhões se utiliza a relação potência/peso.

A infraestrutura viária no Vissim é baseada na topologia de *link* e conectores (nós). O usuário deve inserir dados como: número de pistas do *link*, o tipo de comportamento do motorista (urbano – “*Urban*”, faixa – “*Right-side rule*”, rodovias – “*freeway*”), altimetria e largura da faixa. Conjuntamente com essas informações, também é informado o volume dos veículos, as composições de tráfego e as distribuições de velocidade desejadas de diferentes tipos de veículos.

Por fim, o fluxo de tráfego no Vissim é um modelo microscópico, discreto, estocástico, baseado em tempo e com unidade de veículos como objetos únicos. O modelo contém um algoritmo psicofísico de tráfego de seguimento veicular (“*car-following*”), para descrever o movimento de cada veículo de forma longitudinal e um algoritmo de mudança de faixa (“*lane-change*”), baseado em regras para os movimentos laterais (PTV, 2017). Ressalta-se que esses algoritmos possuem parâmetros que afetam diretamente as interações dos veículos e causam diferenças

substanciais nos resultados da simulação e, portanto, devem ser considerados no procedimento de calibração.

4.4 MODELOS COMPORTAMENTAIS DO VISSIM

Os modelos implantados no Vissim são baseados nos trabalhos de pesquisa de Wiedemann (1974 e 1991), os quais combinam um modelo de percepção de motoristas com exemplos de desempenho de veículos (algoritmos de *car-following* e *lane-change*).

O modelo de Wiedemann (1974 e 1991) permite fornecer informação de qualquer tipo de veículo ou grupo de veículos com características técnicas e de comportamento de condução físicas similares, pressupondo-se que o motorista pode estar em um dos quatro modos de condução que o modelo considera, que são: condução livre, aproximação, seguimento e frenado.

A condução livre acontece quando não existe nenhuma influência de veículos precedentes, onde o motorista busca atingir e manter sua velocidade individual desejada. No caso do modo aproximação, a velocidade do motorista é adaptada à velocidade inferior de um veículo precedente. No seguimento, o motorista seguirá o veículo precedente mantendo uma distância de segurança mais o menos constante, fazendo com que a diferença de velocidades entre os dois veículos seja zero. Por fim, o caso de frenado ocorre quando existe uma aplicação alta de desaceleração abaixo da distância de segurança desejada entre os dois veículos, o que pode acontecer quando o veículo precedente muda a velocidade abruptamente ou se um terceiro muda de faixa.

Para simular o comportamento do tráfego em segmentos homogêneos de rodovias de pista dupla, para o presente estudo, foi necessário calibrar o simulador, variando os valores dos parâmetros dos algoritmos de seguimento (*car-following*) e de mudança de faixa (*lane-change*), apresentados nos itens a seguir.

4.4.1 Parâmetros do algoritmo de seguimento “*car-following*”

O Vissim possui dois algoritmos de seguimento – “*car-following*”, Wiedemann (1974) e Wiedemann (1991), cada um deles para representar distintas situações de tráfego. De acordo com PTV (2017), o modelo de Wiedemann (1974) é compatível com os movimentos de veículos que trafegam em áreas urbanas, caracterizado por: baixas velocidades, *headways* menores, tempo de reação dos motoristas curtos e formação de filas frequentes (fluxo interrompido). O modelo de Wiedemann (1999) é recomendado para trechos rodoviários ou interurbanos marcados por áreas rurais, caracterizados por fluxos ininterruptos, que permitem velocidades elevadas com maiores *headway*. Além disso, esse modelo contém um número maior de parâmetros comportamentais para representar diferentes modos de condução.

Neste estudo foi adotado o algoritmo de *car-following* psicofísico de Wiedemann (1999), por ser o mais compatível com os movimentos de veículos que trafegam em rodovias de pista dupla através de áreas rurais e suburbanas.

O modelo Wiedemann (1999) pode ser calibrado por meio de 10 parâmetros comportamentais. A Figura 4.2 apresenta a interface Vissim, que mostra os parâmetros associados a esse modelo. As explicações dos parâmetros associados são apresentadas a seguir.

Os parâmetros " Distância à frente " (*Look ahead distance*) determinam as distâncias mínimas e máximas, bem como o número de veículos na frente de um motorista no mesmo *link* que pode ser observado.

Os parâmetros “Distância para trás” (*Look back distance*) determinam as distâncias máximas e mínimas que um motorista pode ver para trás dentro do mesmo *link* para reagir a outros veículos que estão atrás.

Os parâmetros de "falta de atenção temporária" (*temporary lack of attention*) determinam a probabilidade e a duração do tempo em que o condutor não reage ao comportamento do veículo principal.

O parâmetro “comportamento de *closeup* suave” (*smooth closeup behavior*) determina se os motoristas diminuem ou não a velocidade ao abordar os obstáculos em pé. Se for verificado, os condutores irão se preparar para parar atrás do obstáculo da distância máxima à frente. Se não for verificado, os motoristas seguirão o comportamento normal e não considerarão o obstáculo.

O parâmetro “distância de parada para obstáculos estáticos” (*standstill distance for static obstacles*) determina a distância que os motoristas devem ter enquanto se mantêm em montante de todos os obstáculos estáticos. A distância pode ser corrigida marcando a caixa, caso contrário seria um valor aleatório, seguindo uma distribuição normal com a média de 0.5 m.

Na caixa dos parâmetros do modelo de carro, existem 10 parâmetros (CC0-CC9) (PARK & SCHNEEBERGER, 2003). Os primeiros 7 parâmetros (CC0 – CC6) são usados para determinar os limiares de seguimento do carro e os 3 últimos (CC7, CC8 e CC9) para simular funções de aceleração e desaceleração, descritas no Quadro 4.1.

The screenshot shows the 'Driving Behavior' dialog box with the 'Following' tab selected. The 'Car following model' is set to 'Wiedemann 99'. The parameters are as follows:

Parameter	Value
CC0 (Standstill Distance)	1,50 m
CC1 (Headway Time)	2: 0,9 s
CC2 ('Following' Variation)	4,00 m
CC3 (Threshold for Entering 'Following')	-8,00
CC4 (Negative 'Following' Threshold)	-0,35
CC5 (Positive 'Following' Threshold)	0,35
CC6 (Speed dependency of Oscillation)	11,44
CC7 (Oscillation Acceleration)	0,25 m/s ²
CC8 (Standstill Acceleration)	3,50 m/s ²
CC9 (Acceleration with 80 km/h)	1,50 m/s ²

Other visible parameters and settings include: Look ahead distance (min: 0,00 m, max: 250,00 m), Look back distance (min: 0,00 m, max: 150,00 m), Temporary lack of attention (Duration: 0 s, Probability: 0,00 %), Smooth closeup behavior (checked), and Standstill distance (in front of static obstacles) is fix (0,50 m).

Figura 4.2 – Parâmetros do algoritmo de *car-following* do Vissim

Quadro 4.1 – Parâmetros do algoritmo de *car-following*

PARÂMETRO (MIN-MAX)	UNIDADE	DESCRIÇÃO
CC0 (1,0 – 2,0)	(m)	Distância de parada (<i>Standstill Distance</i>). Representa a distância que um motorista deseja manter atrás de um veículo parado. Considerado para o cálculo da distância de segurança, o valor padrão é 1,5. $(AX = CC0)$
CC1 (0,5 – 3,0)	(s)	Tempo de <i>headway</i> (<i>Headway Time</i>). É o intervalo de tempo que o motorista deseja manter com relação ao veículo em sua frente. Considerado para o cálculo da distância de segurança, o valor padrão é 0,9. $(ABX = CC0 + CC1 * V_{seguidor})$
CC2 (0,0 ~ 15,0)	(m)	Variação do parâmetro de seguimento (<i>Following Variation</i>). Serve para limitar a oscilação longitudinal, determinando o maior valor do espaçamento acima da distância de segurança, quando o veículo seguidor se aproxima ao veículo líder. O valor padrão é 4,0. $(SDX = ABX + CC2)$.
CC3 (-30,0 – 0,0)	(s)	Limite para entrar no processo de seguimento (<i>Threshold for Entering Following</i>). Representa o tempo necessário para o veículo iniciar o processo de desaceleração antes de atingir a distância de segurança em relação ao veículo líder. O valor padrão é -8,0. $(SDV = CC3)$.
CC4 (-1,0 ~ 0,0)	(m/s)	Controle de diferenças de velocidade no processo de seguimento (<i>Following Threshold</i>), sendo CC4 para diferença de velocidade negativa e CC5 para diferença de velocidade positiva. Esses parâmetros influenciam na aproximação entre o veículo seguidor e o veículo líder, controlando a diferença de aceleração entre estes dois veículos. O valor padrão é + - 0,35.
CC5 (0,0 ~ 1,0)	(m/s)	
CC6 (0,0 ~ 20,0)	(1/(m * s))	Dependência da velocidade de oscilação (<i>Speed Dependency of Oscillation</i>). Busca representar a influência da distância na oscilação da velocidade dos veículos no processo de seguimento. Se determinar como valor nulo, a oscilação da velocidade é independente da distância com relação ao veículo líder. Valores maiores, levam a uma maior oscilação de velocidade com o aumento da distância. O valor padrão é 11,44.
CC7 (0,0 ~ 1,0)	(m/s ²)	Aceleração durante o processo de oscilação (<i>oscillation acceleration</i>). O valor padrão é 0,25.
CC8 (1,0 ~ 8,0)	(m/s ²)	Aceleração desejada do veículo, quando este começa a se movimentar a partir da situação parada (<i>standstill acceleration</i>). O valor padrão é 3,5.
CC9 (0,5 ~ 3,0)	(m/s ²)	Aceleração desejada para uma velocidade de 80 km/h (<i>acceleration at 80 km/h</i>). O valor padrão é 1,5.

4.4.2 Parâmetros do algoritmo de mudança de faixa “lane-change”

O simulador possui 2 tipos de comportamento em relação às mudanças de faixas: a mudança de faixa necessária, quando há intenção de alterar a rota e atingir um acesso e a mudança de faixa livre, quando o veículo quer trafegar numa faixa menos congestionada, permitindo aumentar a velocidade atual do veículo.

Nos 2 tipos, o motorista que deseja mudar de faixa deve, no primeiro momento, encontrar um tempo de espaço adequado, chamado de *headway*, para a faixa desejada. A dimensão deste espaço dependerá da velocidade do veículo que será ultrapassado e da velocidade de aproximação do veículo que deseja mudar de faixa. A velocidade do veículo que deseja mudar de faixa dependerá da agressividade do motorista e do tempo de reação para considerar a distância adequada à ultrapassagem.

The screenshot shows the 'Driving Behavior' dialog box with the 'Lane Change' tab selected. The 'General behavior' is set to 'Free lane selection'. The 'Necessary lane change (route)' section contains parameters for 'Own' and 'Trailing vehicle' vehicles, including maximum deceleration, -1 m/s² per distance, and accepted deceleration. Other parameters include waiting time before diffusion, minimum headway, safety distance reduction factor, and maximum deceleration for cooperative braking. There are also checkboxes for 'Cooperative lane change', 'Rear correction of lateral position', 'Overtake reduced speed areas', 'Advanced merging', and 'Vehicle routing decisions look ahead'. The 'Active during time period' is set from 1,00 s until 10,00 s after lane change start.

Figura 4.3 – Parâmetros do algoritmo de mudança de faixa do Vissim – *lane change behavior*

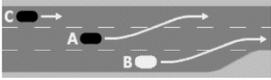
O algoritmo de *lane-change*, pode ser calibrado através de parâmetros de comportamento de mudança de faixa (*lane change behavior*) e de comportamento lateral (*lateral behavior*). Os parâmetros de *lane change behavior* (Figura 4.3) toleram modelar ultrapassagens livres ou restringidos, definir a agressividade dos motoristas no momento da mudança de faixa (através

de limiares de aceleração), tempos de espera máximo para mudança de faixa, distâncias mínimas entre veículos e desacelerações máximas para frenado, descritos na Quadro 4.2 (BETHONICO, 2016).

Quadro 4.2 – Parâmetros do algoritmo de *lane change behavior*

PARÂMETRO (MIN-MAX)	DESCRIÇÃO
<i>General behavior</i>	Define a forma de ultrapassagem: - Escolha livre (<i>free lane selection</i>); - Com regras de tráfego rodoviário (<i>Slow lane rule, fast lane rule</i>).
<i>Necessary lane change (route)</i>	Serve para definir a agressividade dos motoristas no momento da mudança de faixa, para o veículo que muda de faixa (<i>Own</i>) e o para o veículo que se aproxima (<i>Trailing vehicle</i>). Mediante limiares de desaceleração máxima e mínima, e adicionalmente uma taxa de redução ($1,0 \text{ m/s}^2$) para reduzir a desaceleração máxima.
<i>Waiting time before difusion</i> (30 – 90)	Tempo máximo que um veículo em posição de parada pode esperar por um espaço (<i>headway</i>) para mudar de faixa. Quando o veículo atinge esse tempo, o veículo é retirado da rede, o valor padrão é 60,0 segundos.
<i>Min. headway – MH</i> (<i>front/rear</i>) (0,5 – 2,0)	Separação mínima. Define a distância mínima com relação ao veículo da frente, que deve estar disponível para uma mudança de faixa estando parado. O valor padrão é 0,5 m.
<i>Safety distance reduction factor – SD</i> (0,1 – 0,6)	Fator de redução de distância de seguridade. Serve para controlar a distância dos veículos envolvidos numa mudança de faixa. Durante esse processo a distância de seguridade é afetada por este valor. O valor padrão é 0,6 m.
<i>Maximum deceleration for cooperative braking – MD</i> (-9,0 ~ -1,0)	Desaceleração máxima para freado por cooperação. Define se um veículo “A” que se aproxima, iniciará um freado por cooperação permitindo ao veículo “B” mudar para a faixa adjacente. O valor padrão é -3,0 m/s. 
<i>Overtake reduced speed areas</i>	Áreas de velocidade reduzida para ultrapassagem. Serve para colocar restrições de velocidade dependendo das faixas. Se esta opção for marcada, os veículos a montante de uma área de velocidade reduzida podem realizar uma mudança de faixa livre. Esta opção está desativada por <i>default</i> .
<i>Advanced merging</i> 	Permite que mais veículos mudem de faixa com antecedência, assim a capacidade aumenta e a probabilidade de veículos parados esperando por uma mudança de faixa será reduzida. Se esta opção não for selecionada, então dentro dos próximos 50 m, o veículo "A" não freia para qualquer outro veículo vizinho na frente.
<i>Vehicle routing decisions look ahead</i>	Serve para que os veículos seguidores considerem as decisões de rota que escolhem os veículos líderes, para tomar a decisão de qual faixa escolher. Esta opção está desativada por <i>default</i> .

Quadro 4.2 – Parâmetros do algoritmo de *lane change behavior* (cont.)

PARÂMETRO (MIN-MAX)	DESCRIÇÃO
<p><i>Cooperative lane change</i></p> 	<p>Mudança de faixa por cooperação. Define se um veículo “A” deseja iniciar uma frenagem cooperativa ou um intento de mudar de faixa com a finalidade de fazer espaço para que um veículo líder “B” consiga fazer a mudança de faixa. Esta opção está desativada por <i>default</i>.</p>
<p><i>Rear correction of lateral position</i></p>	<p>Serve para fazer uma correção de posição lateral. Quando uma mudança de faixa ocorrer em uma velocidade menor que a especificada, isso faz com que o veículo seja alinhado ao meio da pista no final da mudança de faixa, em vez de no ângulo da pista original. Esta opção está desativada por <i>default</i>.</p>

Os parâmetros de *lateral-behavior*, (Figura 4.4), consideram as faixas de uma rodovia ocupadas em sua totalidade pela largura de um veículo. Esses parâmetros admitem que os veículos viajem em diferentes posições laterais, permitindo modelar ultrapassagens na mesma faixa ou em faixas adjacentes, sempre que se tenha espaço suficiente. Comportamentos predeterminados são definidos com base nos parâmetros descritos no Quadro 4.3.

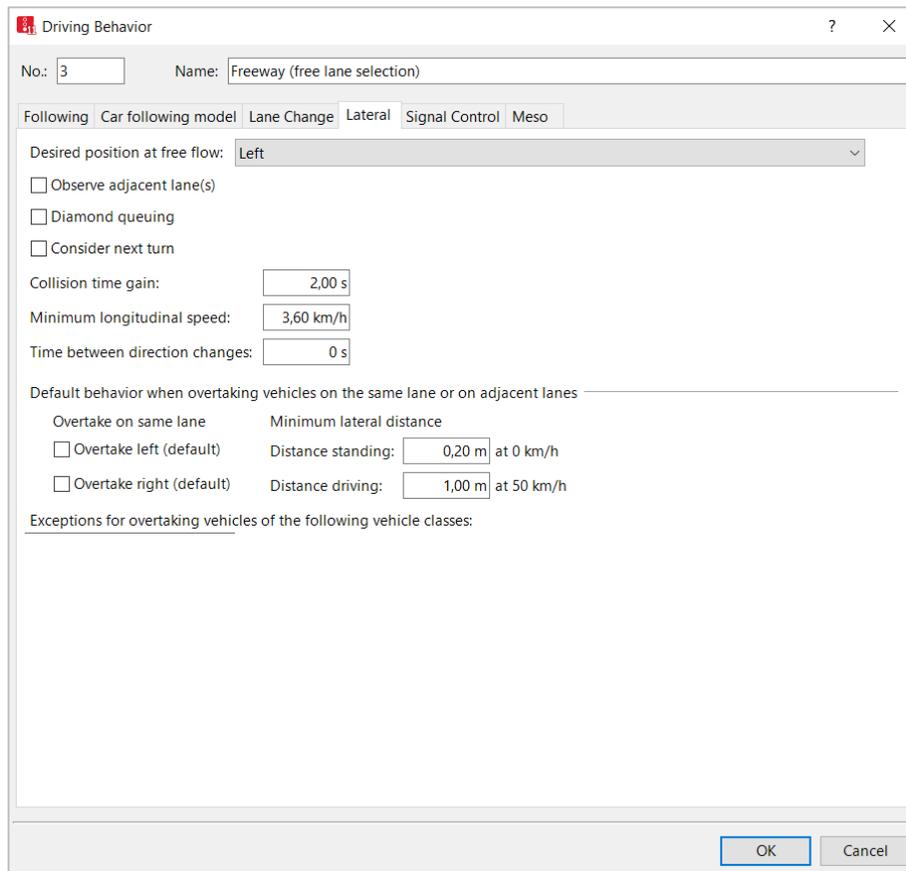


Figura 4.4 – Parâmetros do algoritmo de mudança de faixa do Vissim – *lateral behavior*

Quadro 4.3 – Parâmetros do algoritmo de *lateral behavior*

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
<i>Desired position at free flow</i>	Permite definir a posição lateral desejada de um veículo dentro de uma faixa durante fluxo livre: centro, direita, esquerda ou sem definição.
<i>Observe adjacent lane (s)</i>	Serve para manter a distância lateral com os veículos da faixa seguinte, além dos veículos que estão viajando nas faixas adjacentes. Se esta opção não está ativada os veículos das faixas adjacentes são ignorados. Nota que ao utilizar essa opção se reduzirá significativamente a velocidade da simulação. Para este estudo não foi considerado.
<i>Diamond shaped queuing</i>	Filas em forma de diamante. Permite a formação de filas escalonadas para representar uma formação dos veículos mais realista.
<i>Consider next turning direction</i>	Serve para que os veículos seguidores consideram a direção de giro dos veículos líderes, para a toma de decisões de seu comportamento, e não da distância de seguridade de faixas.
<i>Collision time gain</i>	Se considera como o valor de tempo que deve ter a mais o veículo seguidor com relação ao veículo líder, para que exista a possibilidade de realizar uma mudança de posição lateral de faixa. O valor padrão é de 2,0 seg.
<i>Minimum longitudinal speed</i>	Velocidade longitudinal mínima que ainda permite movimentos laterais. O valor padrão de 1,0 km/h permite que os veículos possam movimentar-se lateralmente até antes de parar o veículo.
<i>Time between direction changes</i>	Utilizado para definir quantos segundos de simulação devem passar entre o início de um movimento lateral à direita e o início do seguinte movimento lateral a esquerda (e vice-versa), limitando a oscilação livre dos veículos. O valor padrão é de 0,0 seg.
<i>Default behavior when overtaking vehicles on the same lane or on adjacent lanes</i>	Serve para modelar o comportamento padrão de ultrapassagem de veículos na mesma pista ou nas faixas adjacentes. - <i>Overtake on same lane</i> (ultrapassagem na mesma faixa): seleciona todas as classes de veículos para ser ultrapassado na mesma faixa por qualquer tipo de veículo e por qualquer lado, esquerda ou direita. Para este estudo não foi considerado. - <i>Minimum lateral distance</i> (distância lateral mínima): distância mínima entre veículos na ultrapassagem dentro da mesma pista ou a faixa adjacente. O valor padrão é 1,0 m.
<i>Exceptions for overtaking vehicles of the following vehicle classes</i>	Se utiliza para escolher as classes de veículos que podem ser ultrapassados dentro de uma pista, considerando os veículos que apresentem o mesmo comportamento de condução.

Na bibliografia, encontram-se trabalhos que utilizam dados agregados de fluxo e velocidades médias de veículos. Gomes *et al.* (2004), para representar redes de vias rurais no estado de Califórnia nos Estados Unidos, utilizou dados agregados do percentual de veículos comerciais, calibrando um conjunto limitado de parâmetros (CC0, CC1, CC4, CC5 e parâmetros de

desaceleração máxima do algoritmo de mudança de faixa), concluindo que estes são suficientes para uma correta representação da realidade. No mesmo estado da Califórnia, Menneni *et al.* (2008) utilizou dados agregados de sensores para calibrar 5 parâmetros do algoritmo de *car-following* (CC1, CC2, CC3, CC4, CC5), no intuito de representar uma rede de tráfego localizada na região.

No estado do Texas nos Estados Unidos, Lownes & Machemehl (2006) procuraram representar o impacto das alterações viárias na capacidade das rodovias, verificando-se que os parâmetros do algoritmo de *car-following* (CC0, CC1, CC4 e CC5), bem como a distância de visibilidade e desaceleração do algoritmo de mudança de faixa, são os fatores que exercem mais influência na calibração do comportamento dos motoristas.

O estudo de Ambadipudi *et al.* (2006), na cidade de Columbus, nos Estados Unidos, procurou representar uma rede da cidade, utilizando para a calibração do algoritmo de *car-following* os parâmetros CC1, CC4 e CC5, além do parâmetro de mudança de faixas relativo à distância ao ponto de parada de emergência, que afeta o perfil de desacelerações de veículos quando seguem rotas pré-determinadas.

Em uma revisão da calibração dos parâmetros de Vissim, Oliveira & Cybis (2008) identificaram como relevantes para a calibração de trechos rodoviários, os parâmetros CC0, CC1, CC4 e CC5. Estes parâmetros influenciam diretamente as velocidades e capacidade da rodovia, atuando no espaçamento desejado de tráfego entre veículos, que ajudaram para a análise de sensibilidade aos estudos de caso de autoestradas brasileiras (RS-030 e BR-101).

Bham & Vallati (2011), propuseram adaptações na geometria dos acessos de uma rodovia a partir do estudo da distribuição do espaçamento entre veículos em faixas exclusivas para caminhões. Os autores calibraram somente alguns parâmetros de *car-following* (CC0, CC1, CC2, CC4 e CC5), assim como o parâmetro de mudança de faixa relativo ao fator de redução de distância segura (*Safety distance reduction factor*).

O estudo de Yeam *et al.*, (2016) por meio de observações de campo em 12 rodovias dos Estados Unidos e o processo de calibração e testes de sensibilidade dos parâmetros do simulador Vissim, indicou que os principais parâmetros para replicar as condições congestionadas observadas no

campo foram CC0, CC1, CC2, além da separação mínima (*MH*) e o fator de redução de distância segura (*SD*).

No estudo de Nicholas *et al.*, (2019) desenvolvido para calibrar o modelo de microsimulação Vissim para o fechamento de vias rurais no estado do Alabama, nos Estados Unidos determinaram que resultados realistas do modelo poderiam ser melhor alcançados através de modificações dos parâmetros CC0, CC1 e os parâmetros de aceleração de caminhões. Resultado parecido também encontraram Lownes & Machemehl (2006), que consideraram o parâmetro CC1 (*Time headway*) como o mais crítico para o desenvolvimento do modelo e a determinação de fluxos de tráfego.

Seguindo as recomendações dos referidos autores, outro estudo no Brasil, de Caleffi *et al.* (2012), utilizou dados de velocidade média de veículos obtidos por meio de laços indutivos e filmagens da rodovia BR-290. Para calibrar apenas os parâmetros CC0, CC1, CC4 e CC5 do algoritmo de *car-following*, desaceleração máxima e fator de redução de distância segura para o algoritmo de mudança de faixa.

Outro estudo nacional, mais recente, de Bethonico *et al.* (2016), propõe um método de calibração do simulador Vissim para um trecho do Rodoanel de Mário Covas (SP-021), mediante dados de sensores das rodovias do estado de São Paulo. Definiu-se que deveriam ser calibrados os parâmetros CC0, CC1, CC2, CC3, CC4, CC5 (algoritmo *car-following*) e os parâmetros do algoritmo de mudança de faixa, *Minimum headway (front/rear)*, *Safety distance reduction factor*, *Maximum deceleration for cooperative braking* e *to slower lane if collision time above*.

Por fim, com base na revisão bibliográfica de estudos relacionados à calibração de modelos de simulação Vissim é possível determinar que os parâmetros dos algoritmos que mais influenciam nas capacidades e velocidades das rodoviárias simuladas são a “distância de parada – CC0”, o “tempo de *headway* – CC1” e os “limites do *following* negativos e positivos – CC4 e CC5”.

4.4.3 Lógica de desempenho veicular

O Vissim permite agrupar veículos com características técnicas de condução similares por tipos de veículos e posteriormente classificar em classes de veículos. As classes de veículos fornecem a base para dados de velocidade, avaliações de comportamento, seleção de caminhos e outros objetivos da rede (GEISTEFELDT, 2015).

Para descrever a lógica de desempenho dos veículos, o Vissim disponibiliza 6 tipos diferentes de veículos, os quais são agrupados em 5 categorias, como mostra a Tabela 4.1. Com base nos tipos de veículos é possível definir nossos próprios tipos, por exemplo, ônibus padrão, caminhão, caminhão de reboque e caminhão de semireboque.

Tabela 4.1 – Categorias de veículos do Vissim

TIPOS	ID	CATEGORIA
<i>Car</i>	10	Carro
<i>HGV – “Heavy good vehicles”</i>	20	Veículos Pesados
<i>Bus</i>	30	Ônibus
<i>Tram</i>	40	“Sem porque não se baseia na velocidade desejada”
<i>Man</i>	50	Pedestres
<i>Woman</i>		
<i>Bike</i>	60	Bicicletas

O atributo da categoria de veículos serve para especificar seu comportamento básico no trânsito, permitindo alterar propriedades de velocidade, aceleração, peso, potência e forma (comprimento ou largura). Se os veículos de um tipo diferirem apenas em sua forma, comprimento ou largura, o usuário poderá distingui-los pela distribuição do modelo 2D/3D.

Ressalta-se que o Vissim calcula a aceleração de um veículo durante o fluxo de tráfego em função da velocidade desejada, considerado um parâmetro particularmente importante na microsimulação de tráfego, pois afeta a capacidade do *link* e os tempos de viagem alcançáveis. Essa velocidade é definida como a velocidade que o motorista viajará se não for impedido por outros veículos ou algum tipo de controle de tráfego. As velocidades desejadas no Vissim são determinadas através de uma distribuição acumulada de velocidades que podem ser definidas

independentemente do tipo de veículo ou tipo de pedestre. A Figura 4.5 apresenta algumas das curvas predefinidas de velocidade desejada propostas pelo simulador.

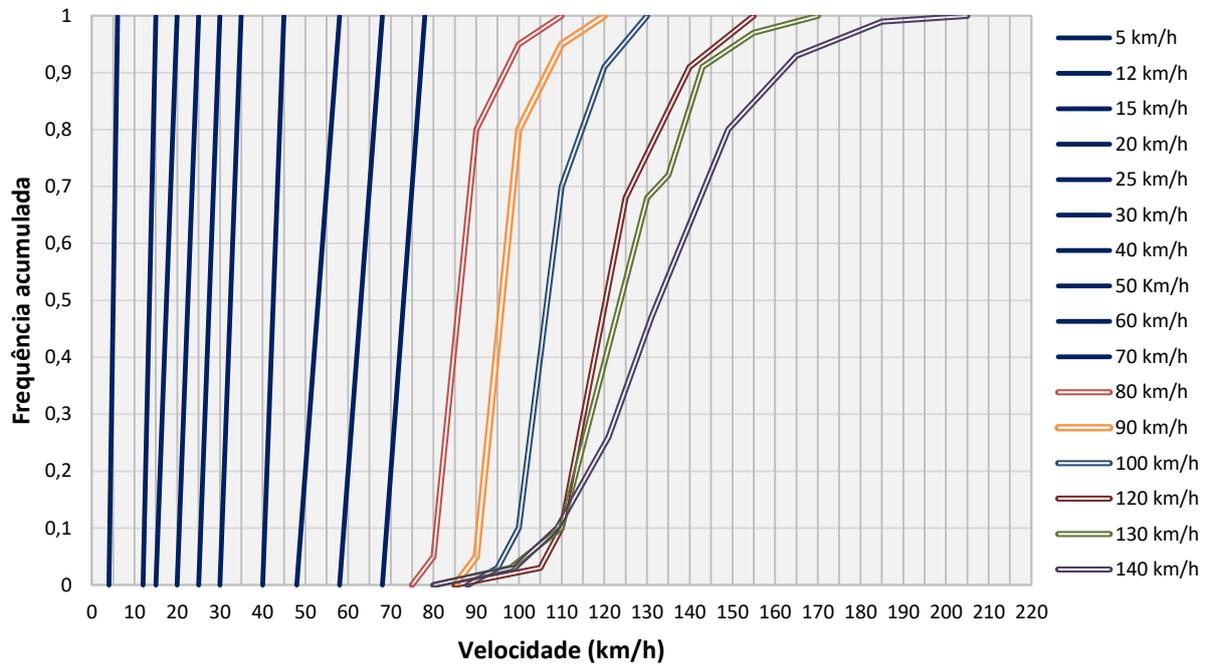


Figura 4.5 – Distribuição de velocidade desejada

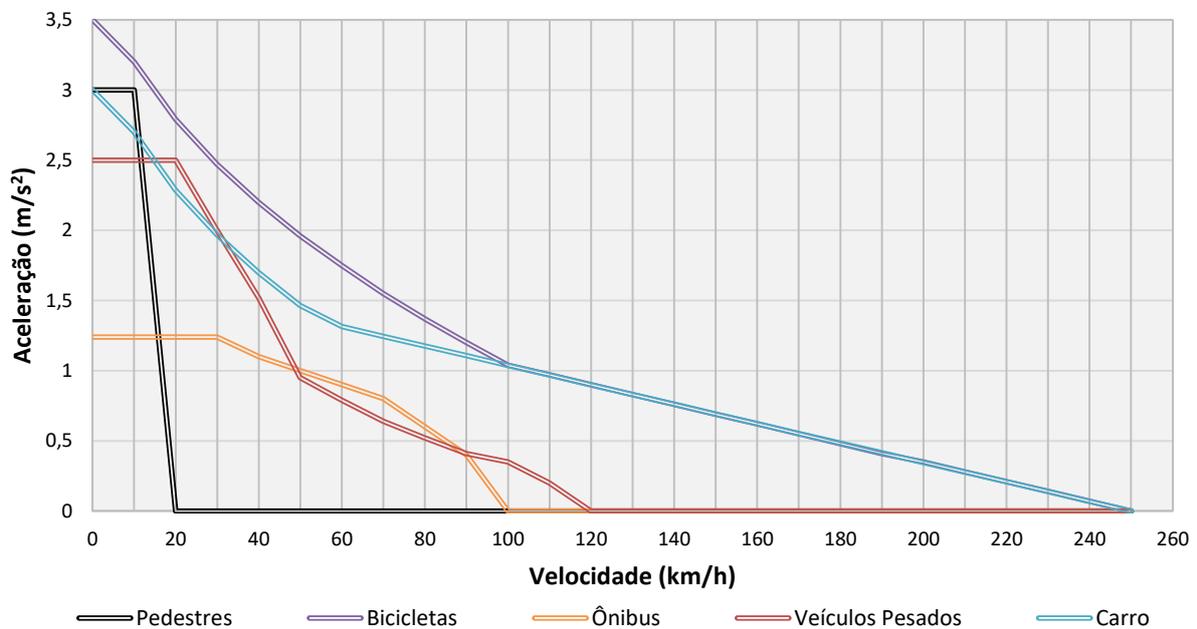


Figura 4.6 – Valores *default* das curvas de aceleração para as categorias de veículos no Vissim

Para explicar as diferenças no comportamento de condução de vários motoristas e diferentes propriedades dos veículos durante a aceleração e desaceleração, o Vissim usa 2 tipos de funções para cada uma delas, sendo ilustradas como curvas onde o usuário pode atribuir funções de aceleração e desaceleração aos tipos de veículo de sua escolha. A Figura 4.6 mostra os pontos intermediários das acelerações *default* para veículos e para pedestres no Vissim.

4.4.4 Dados de saída do Vissim

A partir dos parâmetros de entrada e da construção da rede de simulação, o modelo gera indicadores técnicos representativos da infraestrutura viária. Com essa base de dados é possível produzir diversas informações durante as simulações, fornecendo dados do *link*, áreas, nós, número de veículos, velocidades, aceleração, distribuições de tempo de viagem, tempo de atraso, consumo de combustível, emissões de poluentes, tamanho de filas e distância percorrida, (PTV, 2017). Estes podem ser dados brutos ou dados agregados, que dependendo do tipo de uso são armazenados como arquivos de texto ou como base de dados. Os tipos de medidas de desempenho fornecidas pelo modelo Vissim são apresentados na Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Medidas de desempenho

MEDIDAS DE DESEMPENHO (MD)	CARATERÍSTICA
Volumes de tráfego	<ul style="list-style-type: none"> • Para cada trecho (<i>link</i>) em intervalos de tempo de uma hora (veíc/h); • Porcentagem de fluxos por tipo de veículo.
Tempos de viagem	<ul style="list-style-type: none"> • Para uma seção de início e fim; • Tempo de viagem médio (que inclui os tempos de atraso).
Demoras	<ul style="list-style-type: none"> • Dados de demoras para a rede por tipo de veículo; • Tempo de demora médio calculado por seções do trecho (<i>link</i>).
Contadores de fila e paradas de veículos	<ul style="list-style-type: none"> • Permite obter o comprimento médio de fila; • O comprimento máximo de fila; • Número de paradas de veículos na fila.
Mudança de faixa e de velocidade desejada	<ul style="list-style-type: none"> • Permite saber quando e onde aconteceram as mudanças de faixa ou de velocidade dos veículos.

Neste estudo foram utilizados 2 tipos de relatórios de saída do simulador, o *MER* e o *RSR*, o primeiro para coletar o número de veículos no início e final de cada segmento e o segundo para determinar a distribuição de tempos de viagem dos veículos por segmento. Os dados de cada

simulação são salvos como arquivos de texto (Figura 4.7 e Figura 4.8), onde é apresentada uma lista de resultados dos intervalos de tempo, assim como os valores dos atributos executados.

Data Collection (Raw Data)											
File: D:\MODELAGEM\segmento 1\Calibração\TESTE 2 RECALIBRAÇÃO\BR-020 SEG 1 SCENARIOS COM ALTIMETRIA CALIBRAÇÃO_MODELO DE FLUXO.inpx											
Comment:											
Date: quinta-feira, 29 de agosto de 2019 13:50:15											
PTV Vissim 11.00-08 (64 bit) [77763]											
Data collection point	1:	Link	1	lane 1	at	285.127	m.				
Data collection point	2:	Link	1	lane 2	at	285.127	m.				
Data collection point	3:	Link	1	lane 1	at	6885.100	m.				
Data collection point	4:	Link	1	lane 2	at	6885.100	m.				
Measurem.;	t (Entry);	t (Exit);	VehNo;	Vehicle type;	Line;	v[km/h];	b[m/s2];	Occ;	Pers;	tQueue;	VehLength[m];
1;	29.55;	29.72;	5;	100;	0;	88.0;	-0.00;	0.17;	1;	0.0;	4.21;
2;	31.02;	31.16;	6;	100;	0;	110.5;	-0.00;	0.14;	1;	0.0;	4.21;
1;	38.39;	-1.00;	7;	300;	0;	94.3;	-0.00;	0.11;	1;	0.0;	11.54;
1;	-1.00;	38.83;	7;	300;	0;	94.3;	-0.00;	0.33;	1;	0.0;	11.54;
1;	54.06;	54.19;	10;	100;	0;	116.5;	-0.00;	0.13;	1;	0.0;	4.21;
1;	57.02;	-1.00;	11;	620;	0;	99.4;	-0.00;	0.48;	1;	0.0;	16.76;

Figura 4.7 – Relatório MER

Table of Travel Times						
File: D:\MODELAGEM\segmento 1\Calibração\TESTE 2 RECALIBRAÇÃO\BR-020 SEG 1 SCENARIOS COM ALTIMETRIA CALIBRAÇÃO_MODELO DE FLUXO.inpx						
Comment:						
Date: quinta-feira, 29 de agosto de 2019 13:50:15						
PTV Vissim 11.00-08 (64 bit) [77763]						
Time;	No.;	Veh;	VehType;	Trav.;	Delay.;	Dist;
246.1;	1;	6;	100;	215.1;	0.0;	6600.0;
257.9;	1;	10;	100;	203.9;	0.0;	6600.0;
269.8;	1;	13;	100;	204.4;	1.0;	6600.0;
275.0;	1;	17;	100;	201.2;	0.4;	6600.0;
294.8;	1;	18;	100;	208.7;	2.3;	6600.0;
295.9;	1;	11;	620;	238.9;	0.0;	6600.0;

Figura 4.8 – Relatório RSR

4.5 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

O processo de calibração consiste em ajustar os valores dos parâmetros dos algoritmos de seguimento (*car-following*) e de mudança de faixa (*lane-change*), que formam parte da estrutura do microsimulador Vissim, com o propósito de representar a situação do tráfego de pista dupla da região de Brasília. Neste processo, foram considerados os dados coletados em campo para, posteriormente, serem comparados aos valores estimados pelo simulador e desta forma, possibilitar a análise do comportamento do tráfego na região de estudo.

Segundo Ayala (2013), se os resultados produzidos pelo simulador não são satisfatórios, os valores atribuídos aos parâmetros do simulador devem ser modificados até que a comparação entre o cenário real e o simulado sejam considerados aceitáveis. Estes parâmetros variam em função do simulador, da geometria e da área em que o cenário se situa (urbana ou rural). Ressalta-se ainda que, nos cenários urbanos, os parâmetros relacionados a distância de segurança e tempos de reação são os mais relevantes, porém, nos cenários rodoviários, os parâmetros importantes estão mais relacionados a distâncias de segurança e velocidade.

Segundo Park & Kwak (2010), Turley (2007) e Mathew & Radhakrishnan (2010), para identificar parâmetros que afetam a simulação deve-se utilizar procedimentos estatísticos ou algoritmos genéticos onde o processo de calibração é normalmente realizado com base na experiência do pesquisador e na revisão de trabalhos relacionados ao tipo de estudo analisado.

Para a identificação dos principais parâmetros é necessário analisar a variação dos resultados das medidas de desempenho escolhidas no simulador e desta forma ver a influência de cada parâmetro (AYALA, 2013). Depois da obtenção do conjunto de parâmetros, existe a possibilidade de que os valores estejam entre os limites aceitáveis em relação aos dados coletados em campo.

Entretanto, se os valores desse conjunto de parâmetros não forem capazes de representar a realidade em campo é necessário calibrar a rede modelada mediante a utilização de um algoritmo genético (AG) (GOLDBERG, 1989) que, por meio de um conjunto de processos, busca a resolução do problema realizando sucessivas tentativas. A vantagem de se utilizar uma calibração automática é que ela permite aferir vários parâmetros simultaneamente em menos tempo (os parâmetros de calibração costumam ter um alto grau de correlação), assim como permite a verificação dos resultados ao longo do processo, garantindo a modelagem da situação do local em estudo (EGAMI, 2006).

Após empregar o algoritmo genético para selecionar os parâmetros mais adequados na calibração, são utilizados para simular os cenários, os valores coletados para fazer a validação do modelo, de forma que se os resultados são aceitáveis e conseguem representar o comportamento do tráfego na região de estudo e o processo de simulação se dá por terminado.

O procedimento de calibração e validação do modelo de simulação Vissim adotado neste estudo, compõe-se de uma adaptação do procedimento desenvolvido por Park & Qi (2006), apresentado na Figura 4.9, que consiste em dois etapas de calibração e uma etapa de validação, compostas por várias rotinas e teste de avaliação.

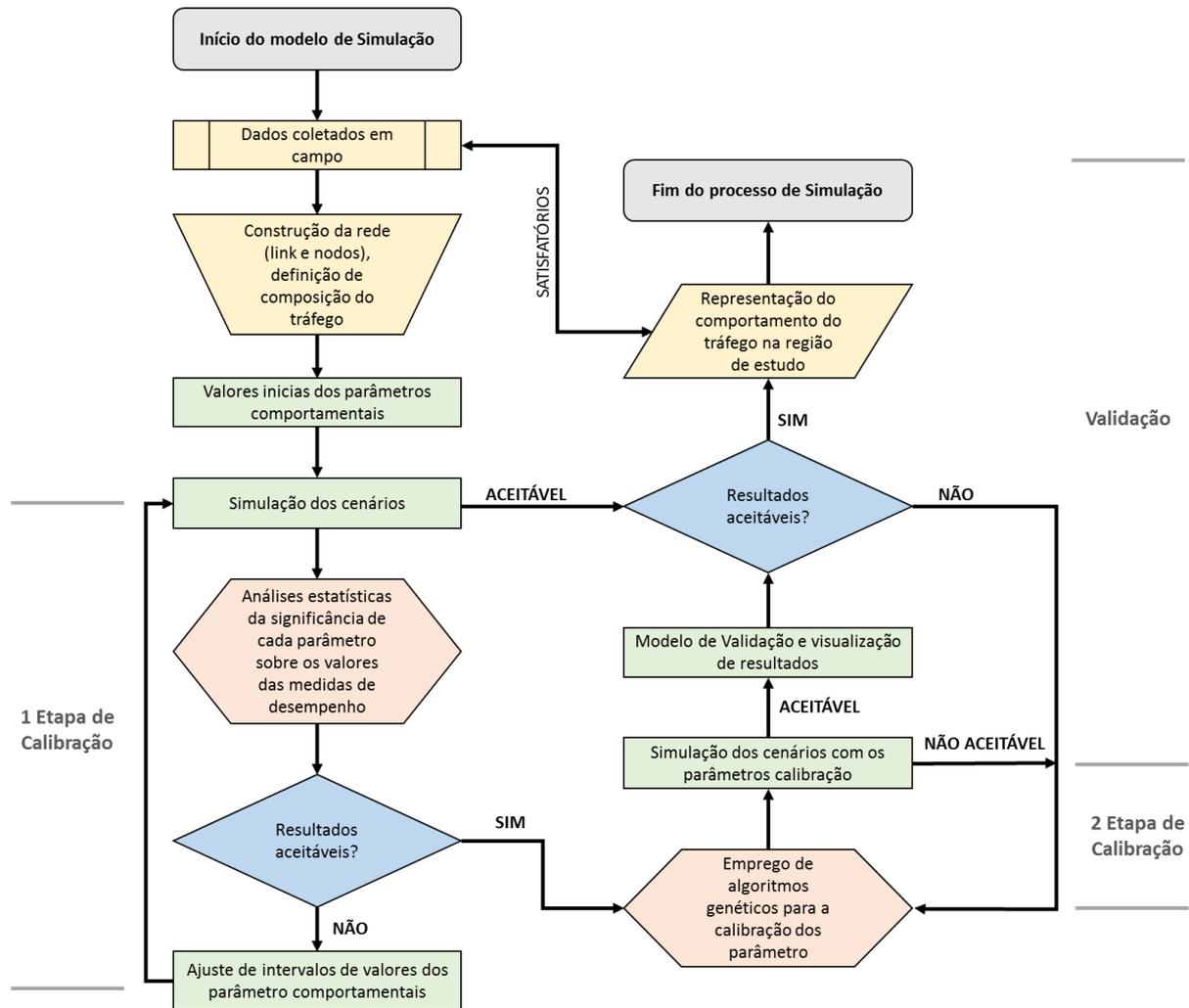


Figura 4.9 – Procedimento para o modelo de simulação microscópica Calibração e Validação
Fonte: adaptado de Park & Qi (2006).

4.5.1 Primeira etapa de calibração

Nesta etapa se implementa o primeiro passo da calibração, procedimento que consiste na identificação de parâmetros e suas faixas de valores aceitáveis.

Mediante a análise de um número razoável de parâmetros, são criados conjuntos de parâmetros usados como cenários experimentais, no intuito de implementar diversas execuções do simulador, gerando resultados que posteriormente serão analisados para cada conjunto.

Os parâmetros que o modelo considera necessários para simular os segmentos viários estão relacionados às suas características geométricas, volumes de tráfego e controladores de fluxo.

O Quadro 4.5 apresenta as categorias que pertencem a cada parâmetro, necessárias à construção de uma rede rodoviária.

Quadro 4.5 – Parâmetros para a construção da rede rodoviária

CATEGORIA	PARÂMETROS	
Sistema de Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo e classes de veículos; • Curvas de aceleração e desaceleração; • Distribuições de peso e potência; • Distribuição de velocidade desejada 	
Seleção do Modelo comportamental	<ul style="list-style-type: none"> • Condução • Seguimento de veículo • Mudança de faixa • Lateral 	
Volumes de tráfego	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo de veículos por tipo • Distribuição percentual por sentido 	
Rede de tráfego	<i>Link</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ponto inicial e final • Pontos intermediários • Número de faixas por sentido
	Conectores	<ul style="list-style-type: none"> • Giros • Interseções • Zonas de bloqueio • Cruzamentos não controlados
Tipos de controladores de fluxo	<ul style="list-style-type: none"> • Controladores semafóricos • Sinal de Pare • Sinal de preferência • Áreas de conflito 	

Os parâmetros são agrupados em 5 categorias, sendo que 4 categorias servem para a representação da rede rodoviária, o que significa que no cenário experimental de cada conjunto de parâmetros eles não sofrerão variação. Porém, no caso do cenário experimental, na categoria de “seleção do modelo comportamental”, que serve para simular o tráfego, estes parâmetros serão objeto de estudo, dada sua importância para a representação do comportamento do motorista. Para essas análises foram selecionados os 10 parâmetros (CC0-CC9) relacionados ao algoritmo de seguimento (*car-following*) e 3 parâmetros (*MH*, *SD* e *MD*) relacionados ao algoritmo de mudança de faixa (*lane-change*).

Nesta etapa foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo mediante a variação dos parâmetros do simulador. Análises estatísticas são realizados com o conjunto de parâmetros definidos para se realizar a simulação do cenário experimental, que inicialmente será com todos

os valores *default* (entrada) de cada parâmetro. Posteriormente, para cada um deles é realizada uma simulação diminuindo o valor de entrada (mínimo), sendo mantidos os valores *default* para os parâmetros restantes. Finalmente, é realizada outra simulação, aumentando o valor de entrada (máximo), sendo mantidos os demais parâmetros com os valores *default*. Portanto, esta sequência de atividades deve ser feita para todos os parâmetros, seguindo a mesma lógica e determinando 3 valores de comparação para cada um deles (AYALA, 2013).

Uma vez gerado para cada parâmetro 3 grupos conforme os valores de *default*, mínimo e máximo (Tabela 4.2). Posteriormente, com os resultados das medidas de desempenho de fluxo e tempo médio de viagem, realizou-se uma análise estatística comparando os resultados. Ressalta-se que para conseguir uma melhor avaliação dos valores obtidos em relação a cada medida de desempenho foi necessário realizar 3 simulações independentes (réplicas) de cada condição testada.

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros dos simulados

VALOR	PARÂMETROS												
	CC0	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9	MH	SD	MD
Default	1.5	0.9	4	-8.0	-0.35	0.35	11.44	0.25	3.5	1.5	0.5	0.6	-3.0
Mínimo	1.0	0.5	0	-30	-1.0	0	0	0	1.0	0.5	0.5	0.1	-9.0
Máximo	2.0	5	15	0	0	1	20	1.0	8.0	3.0	2.0	0.6	-1.0

Para determinar quais parâmetros de comportamento dos condutores têm impacto sobre a modelagem dos segmentos em estudo, foi necessário realizar o seguinte procedimento:

- realizar uma análise de normalidade da distribuição dos parâmetros por meio de dois testes, o Kolmogorov-Smirnoff (*K-S*) e Shapiro-Wilk (*S-W*). São considerados normais se os dois testes qualificam o grupo como normal, caso contrário, o grupo é considerado não normal;
- se o conjunto de valores apresenta distribuição normal, realiza-se uma análise de variância para testar a igualdade de valores dos três conjuntos, por meio do Teste de Levene;
- se os três conjuntos de dados são normalmente distribuídos e as variâncias não são estatisticamente diferentes, realiza-se uma comparação entre os resultados usando *ANOVA*. Assim, será determinada a significância de variação dos valores de cada

parâmetro sobre as médias de cada medida de desempenho selecionada. Caso os três conjuntos não satisfaçam as condições de normalidade e de igualdade de variâncias, deve-se realizar o teste de Kruskal-Wallis;

- por fim, aqueles parâmetros com resultados dos valores dos grupos para uma das medidas de desempenho não iguais são considerados impactantes para os resultados das simulações.

Tabela 4.3 – Valores dos testes de normalidade para o Segmento 1 – Fluxo e tempo médio de viagem

VALORES DE ENTRADA	MÍNIMO				DEFAULT				MÁXIMO			
	Fluxo		Tempo médio de viagem		Fluxo		Tempo médio de viagem		Fluxo		Tempo médio de viagem	
	K-S	S-W	K-S	S-W	K-S	S-W	K-S	S-W	K-S	S-W	K-S	S-W
CC0	0,132	0,899	0,153	0,921	0,115	0,900	0,126	0,935	0,114	0,910	0,145	0,940
CC1	0,135	0,897	0,191	0,876	0,115	0,900	0,126	0,935	0,164	0,870	0,175	0,927
CC2	0,146	0,894	0,169	0,922	0,115	0,900	0,126	0,935	0,126	0,906	0,155	0,931
CC3	0,150	0,895	0,130	0,943	0,115	0,900	0,126	0,935	0,124	0,911	0,191	0,914
CC4	0,128	0,899	0,142	0,924	0,115	0,900	0,126	0,935	0,125	0,901	0,151	0,932
CC5	0,129	0,901	0,147	0,924	0,115	0,900	0,126	0,935	0,135	0,906	0,149	0,934
CC6	0,131	0,897	0,153	0,917	0,115	0,900	0,126	0,935	0,133	0,899	0,174	0,910
CC7	0,129	0,903	0,178	0,922	0,115	0,900	0,126	0,935	0,133	0,904	0,202	0,913
CC8	0,117	0,904	0,162	0,908	0,115	0,900	0,126	0,935	0,140	0,905	0,149	0,925
CC9	0,129	0,908	0,146	0,934	0,115	0,900	0,126	0,935	0,145	0,900	0,136	0,933
MH	0,115	0,900	0,126	0,935	0,115	0,900	0,126	0,935	0,127	0,901	0,174	0,929
SD	0,129	0,905	0,163	0,930	0,115	0,900	0,126	0,935	0,115	0,900	0,126	0,935
MD	0,113	0,904	0,157	0,930	0,115	0,900	0,126	0,935	0,120	0,906	0,169	0,900

Com as premissas anteriores foi realizada a análise e escolha dos conjuntos de parâmetros influentes nos processos de simulação. De acordo com os resultados dos testes de normalidade listados na Tabela 4.3, conclui-se que a distribuição dos dados (fluxo e tempo médio de viagem) é normal nos dois casos (como $p > 0,05$).

Com os grupos de resultados das medidas de desempenho de todos os parâmetros que passaram o teste de normalidade, foi realizado o teste de igualdade de variância (Teste de Levene). De acordo com os resultados dos testes listados na Tabela 4.4, conclui-se que, as variâncias dos grupos CC0, CC2, CC3, CC4, CC5, CC6, CC7, CC8, CC9, MH e SD são homogêneas (como $p > 0,05$).

Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância – Segmento 1

PARÂMETRO	FLUXO				TEMPO MÉDIO DE VIAGEM			
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
CC0	0,004	2	141	0,996	0,376	2	141	0,687
CC1	0,026	2	141	0,974	44,120	2	141	0,000
CC2	0,017	2	141	0,983	0,727	2	141	0,485
CC3	0,000	2	141	1,000	0,317	2	141	0,729
CC4	0,000	2	141	1,000	0,277	2	141	0,758
CC5	0,000	2	141	1,000	0,098	2	141	0,906
CC6	0,015	2	141	0,985	0,240	2	141	0,787
CC7	0,002	2	141	0,998	0,442	2	141	0,644
CC8	0,004	2	141	0,996	0,244	2	141	0,784
CC9	0,004	2	141	0,996	0,172	2	141	0,842
MH	0,002	2	141	0,998	0,251	2	141	0,778
SD	0,000	2	141	1,000	0,065	2	141	0,937
MD	0,000	2	141	1,000	0,152	2	141	0,000

Com base nestes resultados, foi realizada a análise de igualdade das médias utilizando o teste paramétrico *ANOVA* para os parâmetros com variâncias iguais (Tabela 4.5). E o teste de Kruskal-Wallis foi aplicado no caso dos parâmetros CC1 e MD (Tabela 4.6), onde a alteração dos valores dos parâmetros afetaram a medida de desempenho, tempo médio de viagem, uma vez que os resultados das amostras não cumprem com as suposições exigidas pela análise de variância (igualdade das variâncias).

Tabela 4.5 – Resultados teste paramétrico *ANOVA* – Segmento 1

PARÂMETRO	FLUXO					TEMPO MÉDIO DE VIAGEM				
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
CC0	6,222	2	3,111	0,011	0,989	0,264	2	0,132	0,006	0,994
CC2	4,667	2	2,333	0,008	0,992	22,222	2	11,111	0,481	0,619
CC3	3,167	2	1,583	0,006	0,994	14,847	2	7,424	0,353	0,704
CC4	1,264	2	0,632	0,002	0,998	4,014	2	2,007	0,093	0,911
CC5	0,722	2	0,361	0,001	0,999	1,347	2	0,674	0,034	0,967
CC6	2,264	2	1,132	0,004	0,996	6,014	2	3,007	0,138	0,871
CC7	4,042	2	2,021	0,007	0,993	1,500	2	0,750	0,034	0,967
CC8	2,056	2	1,028	0,004	0,996	1,042	2	0,521	0,025	0,976
CC9	4,292	2	2,146	0,008	0,992	0,042	2	0,021	0,001	0,999
MH	3,347	2	1,674	0,006	0,994	1,097	2	0,549	0,027	0,973
SD	0,500	2	0,250	0,001	0,999	2,000	2	1,000	0,052	0,949

Tabela 4.6 – Resultados teste não paramétricos Kruskal-Wallis – Segmento 1

PARÂMETRO	TEMPO MÉDIO DE VIAGEM		
	Chi-Square	df	Asymp. Sig.
CC1	74,475	2	0,000
MD	0,160	2	0,923

A partir da análise de igualdade de médias, foram definidos os conjuntos de parâmetros influentes na simulação. Os parâmetros com médias dos valores dos grupos de resultados para uma dada medida de desempenho não iguais, são considerados impactantes para os resultados das simulações dos cenários estudados (AYALA, 2013).

Segundo as análise de *ANOVA* e Kruskal-Wallis, para a maioria dos parâmetros (CC0, CC2, CC3, CC4, CC5, CC6, CC7, CC8, CC9, MH, SD e MD), os valores dos grupos de resultados das medidas de desempenho para um nível de significância de 5%, determinam que as médias são significativamente iguais, concluindo que as variações dos valores dos parâmetros não diferem nos resultados obtidos pela simulação.

O teste Kruskal-Wallis para o parâmetro CC1 e os resultados da Figura 4.10 e Figura 4.11 mostra que os cenários em que a alteração dos valores deste parâmetro, conduzem a resultados diferentes de velocidade e tempo médio de viagem. De acordo com a Tabela 4.6, o nível de significância observado no teste é 0,000 (valor inferior a 0,01) o que permite concluir que há diferenças nas distribuições das amostras. Em função disso este parâmetro é importante para o processo de simulação do conjunto de dados coletados.

Pela Figura 4.10, observa-se que a velocidade dos automóveis, ônibus e caminhões leves são sensíveis à variação do parâmetro CC1: quanto maior o seu valor, menor a velocidade média. Com relação aos caminhões pesados, não houve variação significativa. Pela Figura 4.11 como esperado, o tempo de viagem aumenta com o aumento do valor do parâmetro, uma vez que já foi observado o aumento da velocidade média com o aumento do CC1. Assim, conclui-se que as medidas de desempenho analisadas são sensíveis à variação deste parâmetro e que ele deve ser usado na calibração do simulador.

Por fim, pode se afirmar que para este estudo de caso, os cenários de simulação com baixas e médias intensidades de fluxo, os parâmetros de calibração demonstraram não ter tanta influência na modelagem. Porém, para altos volumes, os parâmetros de calibração possuem influência significativa na modelagem, principalmente na capacidade e na representação das mudanças de faixas (LASTRAN, 2013).

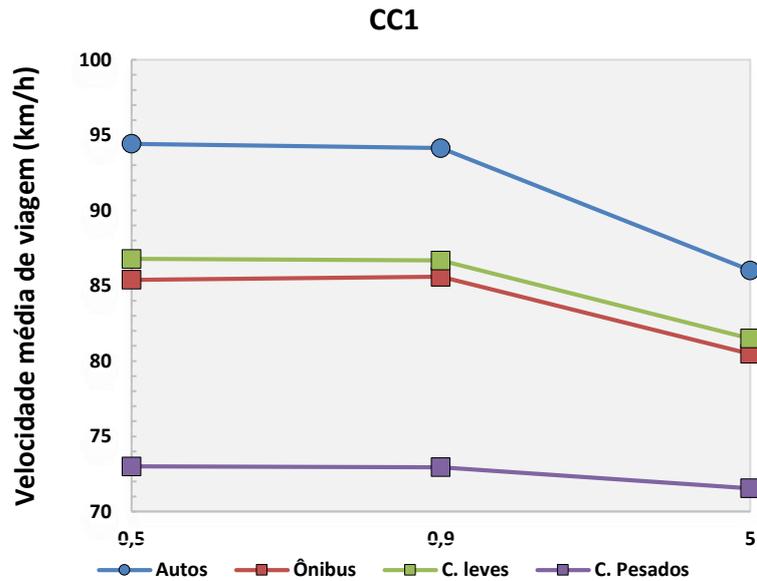


Figura 4.10 – Variação da velocidade média de viagem em função da variação do CC1

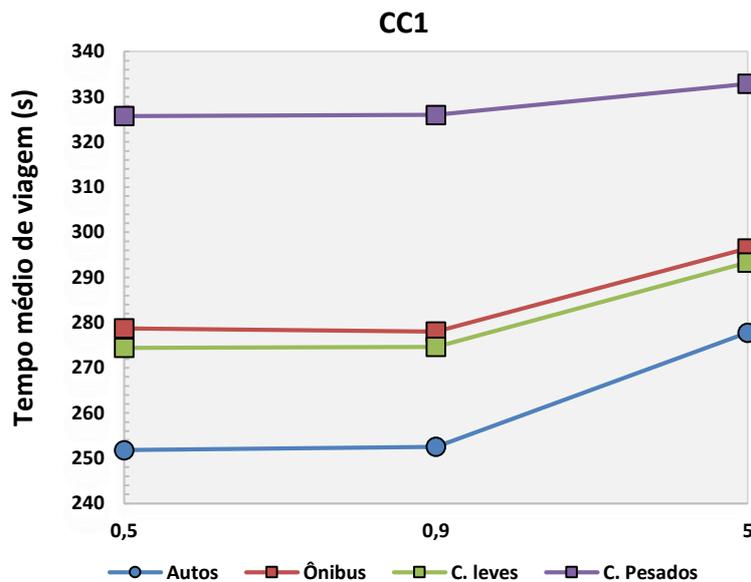


Figura 4.11 – Variação do tempo médio de viagem em função da variação do CC1

Segundo Chitturi & Benekohal (2008), em seu procedimento de calibração dos parâmetros padrão no VISSIM, constatou-se que os parâmetros de comportamento do condutor, nomeadamente como CC0 e CC1 influenciam na capacidade. Assim também para condições de baixa velocidade, o impacto da CC0 foi considerado significativa, mas à medida que a velocidade aumenta o efeito diminui enquanto o impacto do CC1 aumenta.

Segundo os dados coletados, estes apresentaram baixas e médias intensidades de fluxo, o que significa que os veículos trafegam na maior parte do tempo com bastante liberdade, permitindo aos condutores imprimirem velocidades próximas da desejada. Conseqüentemente, as mudanças de faixas acontecem com maior facilidade e os parâmetros comportamentais passam a ter menor impacto devido às condições confortáveis de tráfego. O único parâmetro que demonstrou ter influência significativa na modelagem de baixas e médias intensidades de fluxo foi o parâmetro de “Tempo de *headway* – CC1”, pois ele representa o intervalo de tempo que o motorista deseja manter com relação ao veículo da sua frente, importante para o cálculo da distância de segurança.

4.5.2 Adaptações do modelo Vissim as condições do Brasil

De acordo com os dados apresentados na seção 4.5.1, o parâmetro CC1 seria o único que deve ser usado na calibração do simulador. Isso pode ser explicado pela limitação da quantidade de dados coletados em campo, uma vez que, não existem estações permanentes de coleta de velocidade média de viagem, que permitam obter conjuntos de dados mais representativos de toda a gama de condições operacionais. O que impossibilitam uma análise de sensibilidade mais detalhada, que permita por exemplo determinar a variabilidade dos valores dos parâmetros. Entretanto, com base nesta afirmação existem dois trabalhos que tem como intuito fornecer subsídios para a calibração do Vissim em trechos de fluxo interrompido de rodovias de pista dupla brasileiras, que foram adotados nesta pesquisa como subsídio para a calibração do simulador.

Tabela 4.7 – Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros

SIGLA	DESCRIÇÃO DO PARÂMETROS	MODELO	MELHOR
OBSVEH	<i>Observed Vehicles</i>	<i>Car following</i>	4,00
CC0	<i>Standstill distance</i>	<i>Car following</i>	2,56
CC1	<i>Headway time</i>	<i>Car following</i>	0,75
CC2	<i>Following variation</i>	<i>Car following</i>	7,13
CC3	<i>Threshold for entering following</i>	<i>Car following</i>	-12,92
CC4	<i>Negative following threshold</i>	<i>Car following</i>	-0,54
CC5	<i>Positive following threshold</i>	<i>Car following</i>	0,69
MH	<i>Min. Headway - front/rear</i>	<i>Lane change</i>	1,75
SD	<i>Safety distance reduction factor</i>	<i>Lane change</i>	0,39
MD	<i>Max. Decel. For cooperative braking</i>	<i>Lane change</i>	-1,28
TSL	<i>To slower lane if collision time above</i>	<i>Lane change</i>	3,11

No estudo de Bethonico (2016), foi proposta uma metodologia de calibração do simulador Vissim, para um trecho de rodovia de pista dupla no estado de São Paulo. Envolvendo a calibração dos parâmetros comportamentais do algoritmo de *car-following* e *lane-change*, obtendo com os valores da Tabela 4.7, uma calibração bem-sucedida ao apresentar dados semelhantes aos dados alternativos do tráfego local.

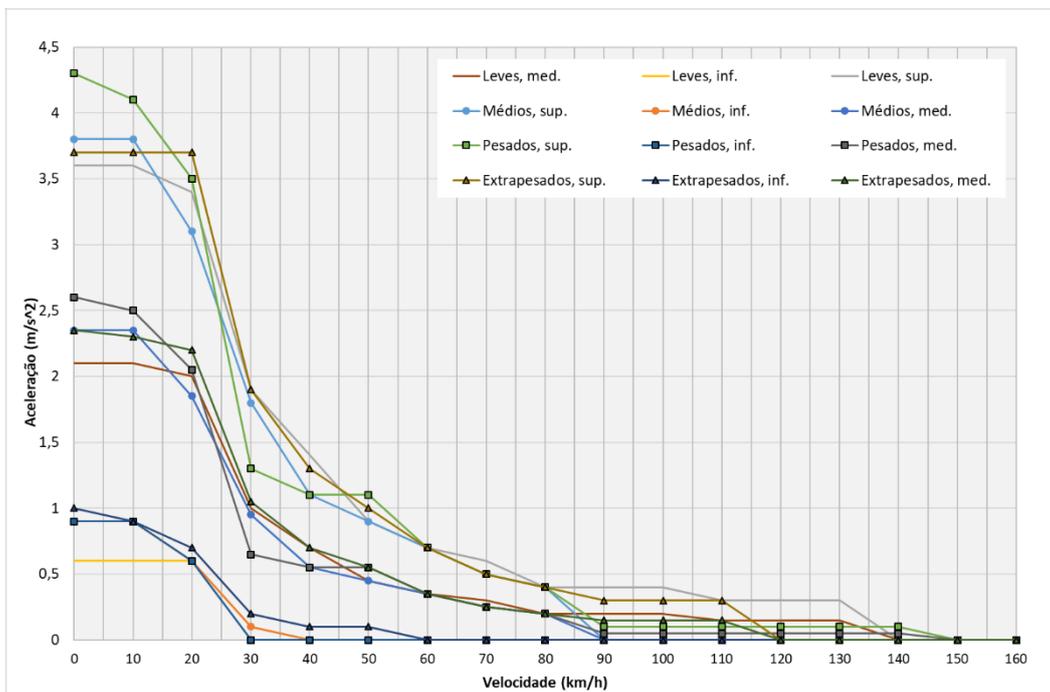
Um estudo mais recente que trata da caracterização da relação massa/potência dos caminhões brasileiros é apresentado por Carvalho (2018) que realizou a calibração das funções de aceleração para caminhões do Vissim em rodovias de pista dupla, utilizando a diferença entre perfis de velocidades simuladas e reais como medida de ajuste. Estimando funções de aceleração capazes de gerar perfis de velocidade simuladas mais próximos dos reais se comparadas à configuração original do simulador.

Uma representação gráfica dessas funções pode ser exemplificada através da Figura 4.12, que contém a configuração de aceleração máxima e desejada para quatro categorias de caminhões, representando assim a região de valores de aceleração (ou desaceleração) que um veículo pode utilizar para modificar sua velocidade. Nesse trabalho, os caminhões são segregados em categorias de acordo com o número de eixos. A classificação utilizada e as especificações veiculares médias para cada categoria foram propostas por Cunha *et al.*, (2008) e pode ser vista na Tabela 4.8.

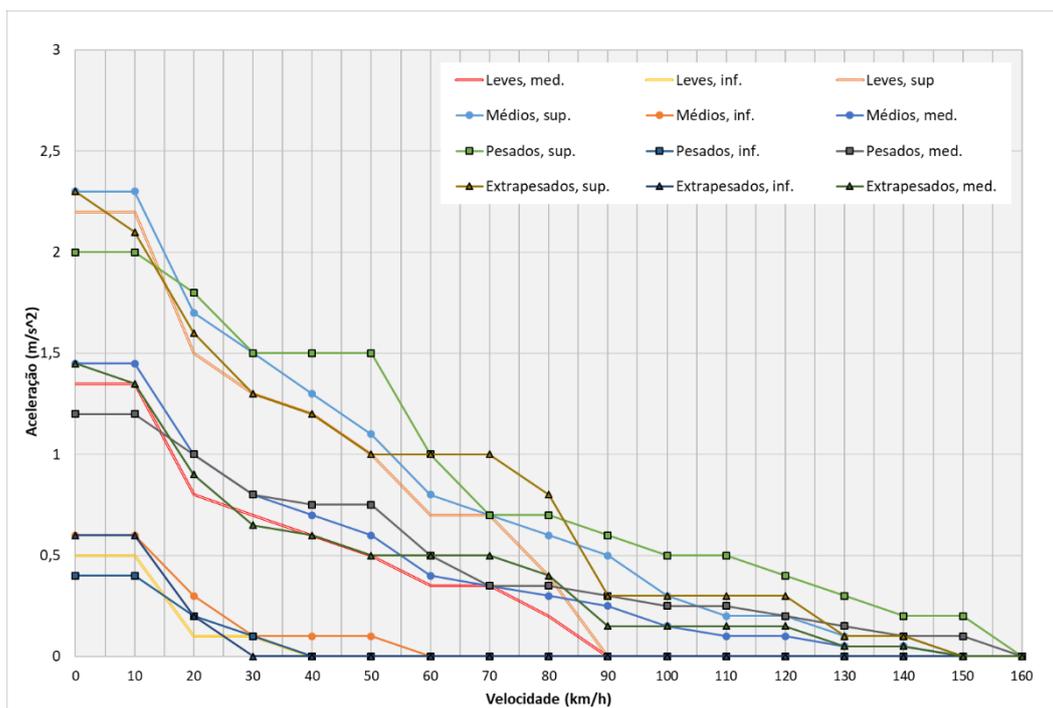
Tabela 4.8 – Características das quatro classes de caminhões

CATEGORIA	EIXOS	COMPRIMENTO MÉDIO (m)	PBT MÉDIO (t)	POTÊNCIA/MASSA MÉDIA (kW/t)
Leves	2	6,8	6,755	14,81
Médios	3	9,1	13,711	9,29
Pesados	4 e 5	15,5	28,583	8,79
Extrapesados	6 ou mais	16,7	38,072	7,2

O grande interesse na caracterização da relação massa/potência dos caminhões brasileiros é o de utilizar os parâmetros comportamentais já calibrados. Reside no fato de que esses parâmetros constituem dados de entrada no simulador, que nos aproxima cada vez mais a dar continuidade aos esforços para obter a calibração do simulador Vissim para as condições brasileiras. Nesses casos, foram aplicados os valores dos parâmetros apresentados por Bethonico (2016) e as funções de aceleração de Carvalho (2018), determinados anteriormente para rodovias de pista dupla do estado de São Paulo, em redes de tráfego distintas para assegurar sua extensibilidade.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Configuração para as funções de: a) aceleração máxima e b) de aceleração desejada dos caminhões

Desta maneira, procurou-se adiantar esforços em estudar como é a determinação dos valores de velocidade desejada que recebem todos os veículos quando são criados, uma vez que ela

determina a velocidade máxima que o veículo atingirá, mesmo que suas curvas interpoladas de aceleração permitam-lhe atingir velocidades maiores. Portanto, esse parâmetro de velocidade é considerado importante numa simulação, dado que as variabilidades dos resultados nas medidas de desempenho são sensíveis aos valores de velocidade utilizadas.

Com tudo, como parte da calibração do modelo, foram definidas as distribuições de velocidades desejadas para as diversas categorias de veículos com base nos dados de velocidade coletados em condição de fluxo livre. Esta codificação das distribuições foi fundamental para representar de forma satisfatória cada segmento em estudo, uma vez que na maior parte do tempo os veículos trafegam em condições confortáveis de tráfego e os parâmetros de seguimento e mudança de faixas tiveram menor impacto na modelagem.

4.5.3 Segunda etapa de Calibração

A calibração representa o processo necessário para determinar que os parâmetros do modelo em conjunto com as medidas de desempenho da rede simulada sejam semelhantes aos valores derivados dos dados de campo observados. Devido à natureza estocástica dos modelos microscópicos de tráfego, todas as plataformas de simulação requerem calibração de vários parâmetros para capturar as interações veiculares do mundo real (LI *et al.*, 2017). No entanto, encontrar os melhores valores do conjunto de parâmetros é considerado um processo dispendioso de busca que pode consumir bastante tempo (LI *et al.*, 2108).

Nesta etapa de calibração, procurou-se encontrar o conjunto de curvas de distribuição de velocidade desejada que seria usado para ajustar o modelo de Vissim. A partir dos parâmetros que foram selecionados na primeira etapa foi realizado um processo de calibração iterativo baseado na teoria de algoritmos genéticos (AG) desenvolvida por Godberg (1989) com base em conceitos de seleção natural e genética. Diversos trabalhos mostraram a eficiência de se utilizar algoritmos genéticos na calibração de parâmetros de modelos de simulação de tráfego (CHEU *et al.*, 1998), (EGAMI *et al.*, 2006) e (CUNHA & SETTI, 2006).

O programa de otimização de AG encontra um conjunto de curvas de distribuição de velocidade desejada para cada tipo de veículo a partir dos dados de velocidade em campo de cada segmento. Para conseguir atingir esses intervalos, a técnica de AG utiliza um conjunto de resultados

iniciais, denominados cromossomos, que evoluem por meios de diversas operações (seleção, *crossover*, predação e mutação), até que se encontre uma solução que melhor atenda a algum dos critérios específicos de avaliação, que no nosso caso equivalem às medidas de desempenho selecionadas e a distribuições de velocidades. Para isso acontecer, a cada geração (iteração) de cromossomos (resultados de simulação) são avaliados por uma função *fitness* para, desta maneira, possibilitar a comparação de uma determinada solução com o intuito de medir se é adequada para dar solução ao problema. Por fim, espera-se que o conjunto de soluções geradas atenda aos critérios de simulação para representar os dados de campo (Figura 4.13).

O desempenho do *AG* está diretamente relacionado a uma escolha adequada dos principais parâmetros de controle (tamanho da população, número de gerações) e dos operadores genéticos utilizados para gerar novas soluções na população (taxa de cruzamento ou *crossover*, taxa de predação e mutação). Abaixo seguem as definições desses parâmetros:

- tamanho da população: é o número de indivíduos, dentro de um intervalo pré-estabelecido, considerados para dar solução aos problemas do caso em estudo;
- número de gerações: é o número de iterações completas a partir da qual o *AG* gera uma nova população;
- taxa de *crossover*: é a probabilidade de um indivíduo ser re combinado com outro, escolhido no processo de reprodução, para a formação de novos indivíduos;
- taxa de predação: serve para inserir diversidade genética na população, eliminando os indivíduos menos adaptados e substituí-los por novos indivíduos gerados aleatoriamente; e
- taxa de mutação: consiste em modificar os cromossomos a partir de novos valores escolhidos aleatoriamente, visando garantir que as gerações seguintes continuem evoluindo, melhorando as soluções.

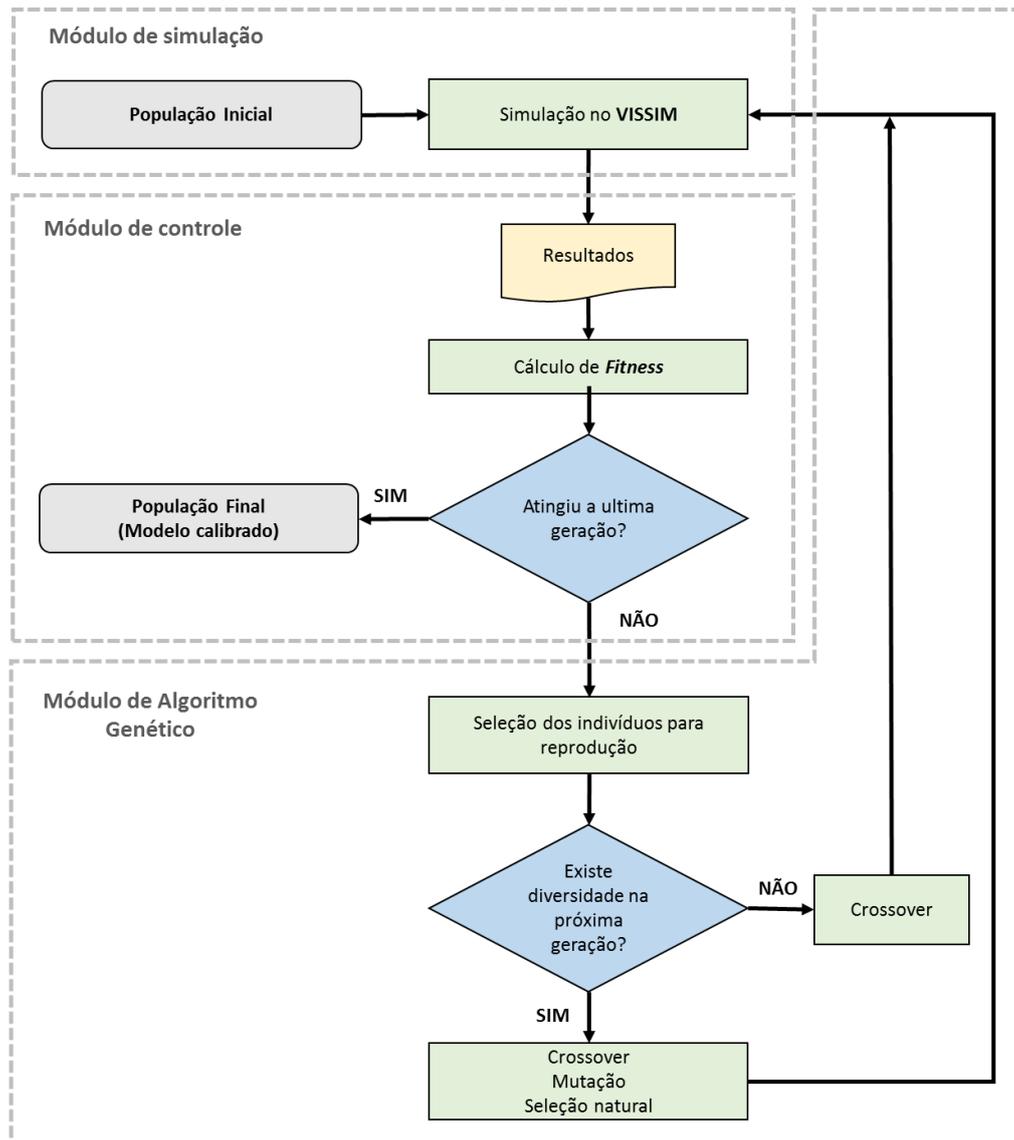


Figura 4.13 – Fluxograma da estrutura do Algoritmo Genético utilizado

Algumas pesquisas que utilizaram AG para calibração dos parâmetros de simuladores de tráfego são citadas a seguir.

- Kim *et al.* (2005) realizaram a calibração de 6 parâmetros comportamentais de condução, incluindo parâmetros de *car-following* e *lane-change* do simulador Vissim numa rodovia do Texas, nos Estados Unidos, utilizando um AG com as seguintes características: número de gerações = 100, número de indivíduos = 30, taxa de mutação = 30% e taxa de crossover = 50%.
- Cunha & Setti (2009) usaram AG para calibrar modelos de performance de veículos em dois simuladores de tráfego, CORSIM e INTEGRATION, utilizando as seguintes

características: número de gerações = 50, número de indivíduos = 40, taxa de predação = 50% – 30%, taxa de mutação = 30% – 10% e taxa de crossover = 50%, respectivamente.

- Bessar Jr. & Setti (2012), com o objetivo de desenvolverem relações fluxo-velocidade para rodovias de pista simples no Brasil usando simulação CORSIM, empregaram um AG com a seguinte configuração: número de gerações = 100, número de indivíduos = 20, taxa de predação = 20%, taxa de mutação = 30%.
- Egami (2006), com o propósito de fazer uma adaptação de procedimento de análise do nível de serviço e capacidade para rodovias de pista simples no Brasil, utilizou o simulador TRARR, utilizando um AG com os seguintes valores de parâmetros: número de gerações = 350, número de indivíduos = 100, taxa de crossover = 50%, taxa de mutação = 30%.

Esses estudos demonstraram que as simulações forneceram melhores resultados com a utilização dos valores obtidos pelos procedimentos de algoritmos genéticos do que utilizando os valores *default* de cada *software*. É importante ressaltar que o êxito do método de AG demanda que seja considerada uma medida de ajuste (função *fitness*) para avaliar o quão próximo estão os dados simulados daqueles observados em campo (medidas de desempenho).

O algoritmo, através da análise do erro das medidas de desempenho, busca selecionar o conjunto de valores dos parâmetros de calibração que fornecem a melhor solução. Segundo Spiegelman *et al.* (2010), uma série de medidas agregadas são utilizadas com esse objetivo, atuando como medidas de ajuste, entre as quais as mais utilizadas estão indicadas no Quadro 4.6.

Segundo Toledo & Koutsopoulos (2004), as medidas *MAE* e *MAPE* fornecem uma visão da distribuição espacial e temporal dos erros e ajudam na identificação das deficiências do modelo, indicando a subestimação ou superestimação das medidas simuladas. Por outro lado, Kim *et al.* (2005) ressalta que a medida *MAPE* é muito utilizada na comparação dos valores das medidas de desempenho simuladas e observadas em campo durante a calibração de parâmetros de tráfego. Desta forma, o conjunto de parâmetros que gera o menor *MAER* é considerado o melhor indicador das condições reais de tráfego.

Quadro 4.6 – Medidas agregadas para estimativa de erro (*MAER*)

NOME	EQUAÇÃO
Erro absoluto médio (<i>MAE</i>)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i - E_i $
Erro proporcional absoluto médio (<i>MAPE</i>)	$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ O_i - E_i }{O_i}$
Raiz quadrada do erro médio (<i>RMSE</i>)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}$
Raiz quadrada do erro percentual médio (<i>RMAPE</i>)	$RMAPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{O_i - E_i}{O_i}\right)^2}$
Onde: O_i = representa a medida de desempenho observada no campo; E_i = representa a medida de desempenho simulada pelo modelo; e N = representa o número de observações.	

Fonte: adaptado de Spiegelman *et al.* (2010).

Nesse caso, as condições reais de tráfego são geralmente mensuradas por medidas de desempenho tais como volume, velocidade, tempos de viagem, grau de saturação, fluxo, comprimento da fila, número de paradas, entre outros. A maioria das pesquisas relacionadas à calibração de simuladores em cenários rodoviários utilizam como medidas de desempenho o tempo de viagem (PARK & QI, 2005), (KIM *et al.*, 2005), o volume (HOUDARKIS *et al.*, 2003), (CHU *et al.*, 2003) e o fluxo (TOLEDO & KOUTSOPOULOS, 2004); (MA & ABDULHAI, 2002).

4.5.4 Função *fitness*

A maneira como o AG avalia o desempenho de um novo cromossomo é utilizando uma função de adaptação. Uma vez formulada a função de *fitness* é calculado o valor de *fitness* e o resultado com cada novo cromossomo pode ser usado como um valor de entrada para a função de adequação para esse cromossomo específico. Em seguida o AG memoriza a adequação de cada cromossomo, verificando se o resultado é aceitável (ou seja, o valor de adequação é menor do que os critérios predeterminados), então o cromossomo atual pode ser considerado como um resultado calibrado. No entanto, se o resultado não for aceitável, todo o processo precisa ser reconduzido com o cromossomo atual como um valor inicial.

Para reduzir a variabilidade do conjunto de parâmetros, Yu & Fan (2017) recomendam a combinação de medidas de fluxo e velocidade para calibrar modelos microscópicos de simulação de tráfego, uma vez que a implementação das funções fitness deveram ser definidas para minimizar a diferença entre os dados de tráfego simulado e observados. De acordo com Karimi & Alecsandru (2019), as funções fitness relacionadas ao problema de calibração são geralmente definidas com base nos atributos de tráfego, como distribuição de *headway*, perfis de velocidade, volume de tráfego, tempo médio de atraso e tempo de viagem.

No estudo de Cunto & Saccomanno (2008), duas medidas de desempenho foram definidas com base no perfil de velocidade e no volume de tráfego para calibrar um modelo de simulação, demonstrado que esse método com vários critérios fornece uma melhor estimativa do desempenho em comparação com a utilização de apenas uma medida.

Segundo Yang *et al.*, (2019), as informações de tempo de viagem podem ajudar como um dos indicadores fundamentais no processo de calibração e verificação de modelos de simulação, em seu estudo o tempo de viagem serviu para avaliar o desempenho de segmentos de rodovias na região de Missouri, nos Estados Unidos. Mediante uma estrutura de algoritmo genético foram empregas medidas de *MAPE* e o *MAE* para a projeção de condicionamento da função fitness.

Para reduzir a variabilidade do conjunto de parâmetros, neste estudo a função fitness foi estabelecida como a combinação de duas medidas de erro, correspondentes a cada uma das medições coletadas em campo. A primeira medida utilizada corresponde à média dos erros relativos de fluxo de veículos na entrada e na saída do segmento simulado. Para conveniência da calibração, se definiram 2 categorias/tipos de veículos, denominados veículos leves (carros de passeio) e veículos pesados (ônibus, caminhões leves e caminhões pesados), para a determinação dos fluxos na entrada e na saída do segmento. Essa medida é representada pela Equação (4.1).

$$MER_x = \frac{1}{N} \sum_{c=1}^N \left\{ \frac{1}{i_{(max)}} \sum_{i=1}^{i_{(max)}} \frac{|F_{Observado} - F_{Simulado}|}{F_{Observado}} \right\} \quad (4.1)$$

Onde:

MER_x = erro absoluto médio de fluxo de cada categoria de veículo (entrada $x = 1$, saída $x = 2$);

c = índice que representa a categoria de veículos leves (1) e veículos pesados (2);

N = total de veículos da categoria c ;

$i_{(max)}$ = total de intervalo de dados da simulação de tráfego;

i = índice que representa o intervalo de 5 min;

$F_{Observado}$ = Fluxo de veículos observado; e

$F_{Simulado}$ = Fluxo de veículos simulado.

A segunda medida utilizada corresponde aos tempos médios de viagem que os veículos gastam para atravessar todo o segmento completamente. A distribuição de saídas do simulador (ou seja, tempos de viagem) são comparadas com os tempos de viagem observados. Com base nesses tempos são determinadas as distribuições de velocidades médias de viagem para cada categoria de veículo (carros de passeio, ônibus, caminhões leves, caminhões pesados).

Posteriormente, por meio das diferenças entre as distribuições acumuladas de velocidade e o cálculo do valor crítico da estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, são comparadas as amostras (simulada e observada), Equação (4.2).

$$Diferença_i = |(FA_{sim})_i - (FA_{obs})_i| \quad (4.2)$$

Onde:

$Diferença_i$ = diferença de frequências acumuladas de tempos médios de viagem;

FA_{obs} = frequência acumulada observada;

FA_{sim} = frequência acumulada simulada; e

i = intervalos de frequência.

As diferenças calculadas para cada intervalo são comparadas, com o valor crítico do teste de Kolmogorov-Smirnov e desta forma verifica-se se os resultados estimados pelo simulador estão dentro dos intervalos observados. Como existem poucas observações de tempos de viagem, o teste de Kolmogorov-Smirnov nos permite comparar amostras de tamanhos desiguais, com a seguinte Equação (4.3).

$$D_{critico} = \beta \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 * n_2}} \quad (4.3)$$

Onde:

n_1, n_2 = tamanho de cada amostra;

β = variável que depende do nível de significância adotada, no caso foi de 5%, $\alpha = 1,36$.

As diferenças calculadas maiores do que valor $D_{critico}$, são somadas para determinar o erro por cada categoria de veículo (Equação (4.4)). Utilizando o erro de cada categoria de veículo se determina o erro relativo das frequências acumuladas das velocidades (Equação (4.5)).

$$Diferença_i > D_{critico}$$

$$RSR_c = \sum_{i=1}^{i(max)} Diferença_i \quad (4.4)$$

Onde:

RSR_c = erro por tipo de veículo; e

c = índice que representa a categoria de veículos; e

i = intervalos de frequência.

$$RSR = \frac{1}{N} \sum_{c=1}^N RSR_c \quad (4.5)$$

Onde:

RSR = erro relativo de frequência acumulada das velocidades; e

N = total de categorias veiculares simuladas.

Por fim, o algoritmo genético usa a combinação das duas medidas anteriores para avaliar o grau de adaptação de um cromossomo, por meio da Equação (4.6), que é uma modificação da equação proposta por Rilett & Kim (2001) e utilizada por Egami (2006), em que os valores das constantes A e β são 100 e 5 respectivamente. Neste estudo o valor de A foi redistribuído em três parcelas que somam 100, para levar em consideração a escala de importância das médias. Quanto maior o *fitness* (mais próximo de 100 menor é a diferença média da geração que está sendo analisada), maior a probabilidade de o cromossomo ser selecionado para produzir descendentes que formam a geração seguinte.

$$\begin{aligned}
 Fitness_i = & A_{ent} * e^{-\beta(MER_1)} + A_{sai} * e^{-\beta(MER_2)} \\
 & + A_{RSR} * e^{-\beta(RSR)}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

$$0 \leq Fitness \leq 100$$

Onde:

$Fitness_i$ = valor da função de adequação para o cromossomo i ; e

A e B = constantes da função ($A_{ent} = 20, A_{sai} = 30, A_{RSR} = 50, \beta = 5$).

4.5.5 Etapa de Validação

Nesta etapa, é usado um conjunto de dados que não foi usado para calibração, no intuito de poder verificar se um modelo não apenas reproduz os dados usados para calibração, mas também dados diferentes daqueles usados para calibração. Segundo Constantinos *et al.*, (2014), não deve ser surpresa que o erro de validação seja muito maior que o erro de calibração. No entanto, a saída do modelo de simulação deve estar dentro de limites aceitáveis que foram determinados no caso ideal antes da simulação real ser executada.

A validação estatística do modelo de simulação, deve ser testada com base na comparação dos resultados estimados pelo simulador e os observados em campo, para serem considerados aceitáveis. Entretanto só medidas de desempenho relacionadas a fluxos de veículos na entrada e saída dos segmentos são utilizadas. Além disso, testes de visualização (gráficos de dispersão) são realizados para auxiliar a comparação entre os dados simulados e os dados observados.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na primeira etapa de calibração do simulador, as comparações dos fluxos observados com os valores estimadas pelo simulador da categoria de carros de passeio mostraram um bom ajuste, acima de 80%. Os tempos de viagem simulados estimaram os padrões de tempo de passagem observados da maioria dos tipos de veículos e as velocidades simuladas de cada segmento foram capazes de replicar as velocidades dos veículos em campo.

Os resultados não conseguiram ser melhores, pois o modelo de simulação é fortemente influenciado pela velocidade inserida no *software* para cada tipo de veículo, estimando velocidades elevadas ou baixas com relação ao observado em campo, demonstrando que a

velocidade influencia no comportamento entre veículos e na quantidade de veículos que podem ser representados num determinado período de tempo.

Verificou-se que a escolha da velocidade desejada é mais importante que a variação dos valores dos parâmetros, pois a variação dos valores padrão, mínimo e máximo não alteraram os resultados. Portanto, uma boa escolha da velocidade desejada para cada veículo é fundamental para obter uma boa calibração do segmento que está sendo estudado, permitindo que os dados de velocidade estimados pelo simulador sejam muito próximos aos coletados em campo.

Considera-se que em cenários com características de baixa intensidades de fluxos de tráfego, os parâmetros de simulação não têm muita influência na modelagem. De modo que para altos volumes de veículos, os parâmetros de calibração podem influenciar significativamente na capacidade e na representação das mudanças de faixa.

O modelo do simulador não consegue representar uma boa calibração dos veículos pesados (ônibus, caminhões leves e caminhões pesados), quando se tem fluxos muito baixos (quantidades menores a 50 veículos). Por outro lado, a representação de fluxos elevados, característicos dos carros de passeio, permite obter melhores resultados no modelo de simulação, ressaltando que na maioria dos segmentos estes tipos de veículo obtiveram a melhor calibração.

5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE DESEMPENHO DO VISSIM

A etapa de calibração inicia com a projeção da rodovia no modelo, definindo as características principais dos elementos de cada segmento que será simulado, especificamente no que se refere à definição das suas características geométricas como número de faixas, largura de pistas, distâncias, acessos, retornos, perfil horizontal e vertical (Figura 5.1). Posteriormente são aplicados outros elementos de rede, como as classes de veículos, as distribuições de velocidade e comportamento de escolha de rotas.

Para este estudo, foram alteradas características *default* dos veículos como tamanho, peso, e perfis de acelerações e desacelerações. Assim como as distribuições de velocidade dos veículos e a distribuição de potência dos automóveis, visando a compatibilidade com o perfil dos veículos brasileiros.



Figura 5.1 – Altimetria e características geométricas

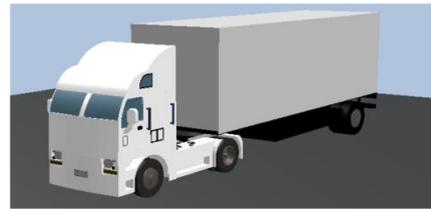
A composição do fluxo de tráfego adotado neste estudo tem 5 diferentes tipos de veículos individuais definidos como: carros de passeio, ônibus, caminhão, reboque e semirreboque. Para o modelo, 4 classes de veículos foram criadas a partir dos tipos de veículos anteriormente mencionados, definidas como: autos (*CAR*), ônibus (*BUS*), caminhões leves (*VCI*) e caminhões pesados (*VC2*), sendo que cada um deles é combinado por vários tipos de veículos conforme é apresentado na Figura 5.2.



21: VC1



22: VC1 TRUCK 30 FT

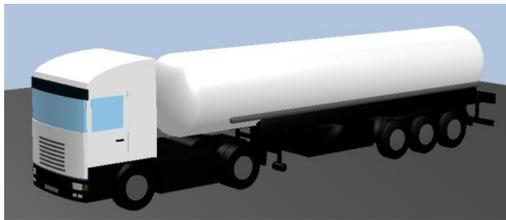


23: VC1 AASHTO

(a)



25: VC2-2-3-R-2-3

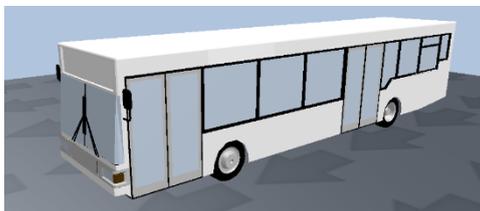


24: VC2-1-1-3



26: VC2-2-3-R-2-3

(b)



31: Ônibus – EU STANDARD



32: Ônibus – AASHTO

(c)



1: Auto – Fiat



2: Auto – Volkswagen



3: Auto – Toyota

(d)

Figura 5.2 – Classes de veículos consideradas dentro do modelo: a) VC1, b) VC2, c) Ônibus e d) Autos

Como as classes de veículos foram arbitradas empiricamente, as distribuições de velocidades desejadas para cada categoria de veículo no simulador e ao mesmo tempo, foram calculadas as distribuições de velocidades praticadas em campo pelos veículos nos segmentos a serem modelados. A Figura 5.3 apresenta as distribuições das velocidades empíricas desejadas e observadas para as classes modeladas.

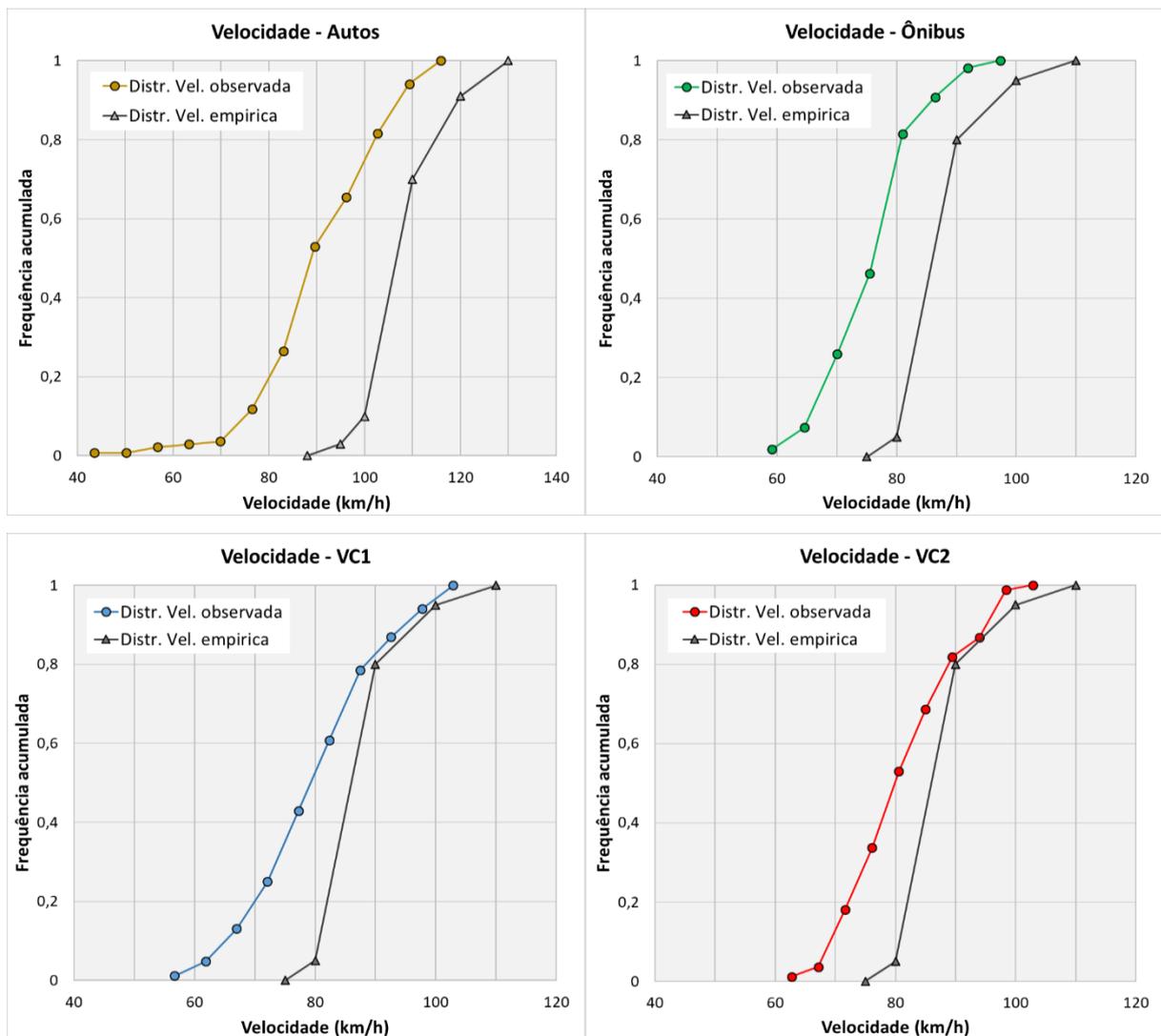


Figura 5.3 – Distribuições de velocidade empíricas (desejadas) e observadas por classe de veículo – segmento 1

Para as modelagens de cada segmento, os parâmetros calibrados foram aqueles determinados nos trabalhos de Bethonico (2016) e Carvalho (2018), indicados pela bibliografia como importantes para a representação de ambientes rodoviários de pista dupla. Uma vez inseridos os parâmetros comportamentais, são incluídos os dados dinâmicos, correspondentes aos fluxos, tipo e composição de veículos, escolha de rotas e características do tráfego.

A distribuição do volume de tráfego foi inserida no programa em intervalos de 5 min, conforme apresentado na Figura 5.4, compreendendo períodos de 0 até 16.200 seg. Os valores de volume de veículos indicaram a necessidade de ajustes nos dados de entrada da simulação, uma vez que os volumes simulados não representavam de maneira adequada a distribuição espacial daqueles observados em campo. A estratégia adotada consistiu em separar a distribuição dos dados referentes aos fluxos de veículos, por meio de *links* de entrada para cada tipo de veículo, que facilitaram a representação do número de veículos no início da área de simulação. Para conseguir isso, conforme apresentado na Figura 5.5, são construídos 4 *links* com extensões de 600 m ao início de cada segmento.

Count: 4	Cont	TimeInt	Volume	VehComp	VolType
1	<input type="checkbox"/>	0-300	384,0	1: 1A (0-300) WARM-UP	Exact
2	<input type="checkbox"/>	300-600	384,0	2: 1A (0-300)	Exact
3	<input type="checkbox"/>	600-900	528,0	3: 1A (300-600)	Exact
4	<input type="checkbox"/>	900-1200	528,0	4: 1A (600-900)	Exact
5	<input type="checkbox"/>	1200-1500	648,0	5: 1A (900-1200)	Exact
6	<input type="checkbox"/>	1500-1800	684,0	6: 1A (1200-1500)	Exact
7	<input type="checkbox"/>	1800-2100	888,0	7: 1A (1500-1800)	Exact
8	<input type="checkbox"/>	2100-2400	900,0	8: 1A (1800-2100)	Exact
9	<input type="checkbox"/>	2400-2700	852,0	9: 1A (2100-2400)	Exact
10	<input type="checkbox"/>	2700-3000	840,0	10: 1A (2400-2700)	Exact
11	<input type="checkbox"/>	3000-3300	1020,0	11: 1A (2700-3000)	Exact
12	<input type="checkbox"/>	3300-3600	1188,0	12: 1A (3000-3300)	Exact
13	<input type="checkbox"/>	3600-3900	1416,0	13: 1A (3300-3600)	Exact
14	<input type="checkbox"/>	3900-4200	1332,0	14: 1A (3600-3900)	Exact
15	<input type="checkbox"/>	4200-4500	1344,0	15: 1A (3900-4200)	Exact
16	<input type="checkbox"/>	4500-4800	1416,0	16: 1A (4200-4500)	Exact
17	<input type="checkbox"/>	4800-5100	1512,0	17: 1A (4500-4800)	Exact
18	<input type="checkbox"/>	5100-5400	1572,0	18: 1A (4800-5100)	Exact
19	<input type="checkbox"/>	5400-5700	1212,0	19: 1A (5100-5400)	Exact
20	<input type="checkbox"/>	5700-6000	972,0	20: 1A (5400-5700)	Exact
21	<input type="checkbox"/>	6000-6300	1044,0	21: 1A (5700-6000)	Exact
22	<input type="checkbox"/>	6300-6600	1008,0	22: 1A (6000-6300)	Exact
23	<input type="checkbox"/>	6600-6900	780,0	23: 1A (6300-6600)	Exact
24	<input type="checkbox"/>	6900-7200	1044,0	24: 1A (6600-6900)	Exact
25	<input type="checkbox"/>	7200-7500	996,0	25: 1A (6900-7200)	Exact

Figura 5.4 – Distribuição de volume por intervalo de tempo de 5 minutos

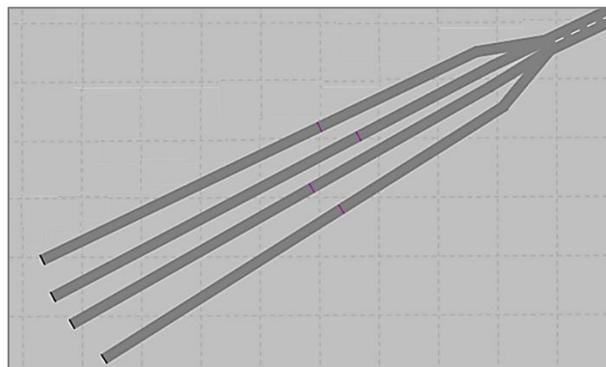


Figura 5.5 – *Links* de entrada para acesso de veículos no segmento de simulação

Posterior a construção da rede de cada segmento, pontos de coleta de dados de fluxo, velocidade e tempo de viagem, foram localizados em locais apropriados, coincidentes com os locais onde foi realizada a coleta de informação em campo. Através dos pontos de coleta de dados, foi possível comparar as condições operacionais dos diferentes segmentos simulados e assim analisar o desempenho das rodovias em estudo. A Figura 5.6 apresenta os pontos de coleta num segmento modelado no *software* Vissim.

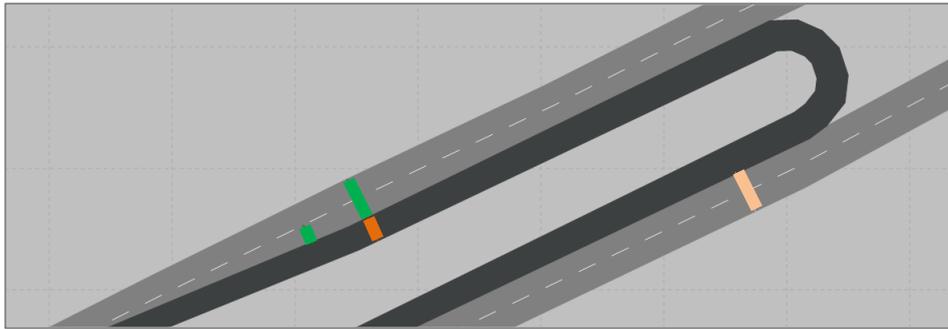


Figura 5.6 – *Layout* de pontos de coleta de dados

Com essas informações e com a utilização do algoritmo genético, o processo de calibração buscou avaliar a sensibilidade do modelo com relação aos perfis de velocidades desejadas empíricas e observadas, e avaliar a sensibilidade do modelo com relação aos parâmetros comportamentais. Fazendo análises dos resultados de fluxo, tempo e velocidade média de viagem de cada um dos segmentos, comparando os resultados observados com os simulados, mediante a verificação de sua diferença percentual.

5.1 ALGORITMO GENÉTICO USADO NA CALIBRAÇÃO DO VISSIM

A calibração envolve a verificação de que o modelo execute logicamente as velocidades observadas em campo. Desse modo o algoritmo genético mediante um processo iterativo de análise de dados de saída do modelo, busca minimizar as diferenças entre o fluxo e o tempo médio de viagem a longo dos segmentos. Conseqüentemente para a modelagem dos segmentos rodoviários foi necessário determinar as velocidades desejadas de cada categoria de veículos dentro do *software*.

Neste processo de calibração o método de otimização do AG, usa um número específico de dígitos que são gerados aleatoriamente, correspondentes aos valores de frequência das curvas

de distribuição de velocidade, para gerar uma combinação de curvas de cada categoria de veículo, que permitam, que uma simulação reproduza as condições de campo.

Para a implementação do Algoritmo genético (AG) foi utilizado a interface de programação de aplicativos do Vissim denominado *Microsofts Component Object Model (COM)*. A interface *COM* fornece o acesso a rede de cada segmento modelado com todos os seus atributos e dados de veículos na simulação, permitindo assim que a simulação, possa ser iniciada e parada, bem como a modificação dos valores de cada parâmetro comportamental e velocidades desejadas, para que possam ser lidas e configuradas (FELLENDORF & VORTISCH, 2010).

A interface *COM* foi usada para comunicar o Vissim com a aplicação do algoritmo genético e desta forma automatizar o processo de calibração do simulador. A técnica de otimização se conecta ao Vissim através de uma sub-rotina mediante a linguagens de programação em *MATLAB* que permitiu a transferência de dados entre os dois programas. O *software MATLAB* atuou como uma interface com Vissim através de um dispositivo externo com sequências de comandos escritas na linguagem de programação própria do *MATLAB*.

O procedimento de calibração inicia a partir de uma condição inicial genérica (população inicial) criada pelo AG, que atribui para cada categoria de veículos uma distribuição de frequências de velocidade, denominadas velocidades desejadas. Logo, o *software Vissim* é executado com esse grupo de curva de velocidade e fornece um conjunto de arquivos de saída (fluxo de veículos e tempos de viagem) e o algoritmo calcula a função de adequação (*fitness*). Finalmente o algoritmo seleciona o melhor conjunto de curvas de distribuição de velocidade para cada categoria de veículos e gera um novo conjunto de curvas que represente a nova geração. Este ciclo continua até que seja produzido o critério de número de iterações desejado.

Os parâmetros do AG utilizados foram selecionados com base em estudos bibliográficos, visando obter uma compensação prática entre o esforço computacional e a precisão da calibração e ter um rendimento do algoritmo de maneira mais significativa.

Dada a necessidade de minimizar o tempo de processamento da calibração, verificou-se que uma simulação com 30 indivíduos e 15 gerações tem uma probabilidade razoável de convergir em uma solução satisfatória, pois o ganho marginal a partir dessa quantidade de gerações não

é relevante, segundo os resultados apresentados na Figura 5.7. O processamento de um *AG* com 30 indivíduos e 100 gerações, dura aproximadamente 3 dias de acordo com os recursos computacionais disponíveis para a pesquisa.

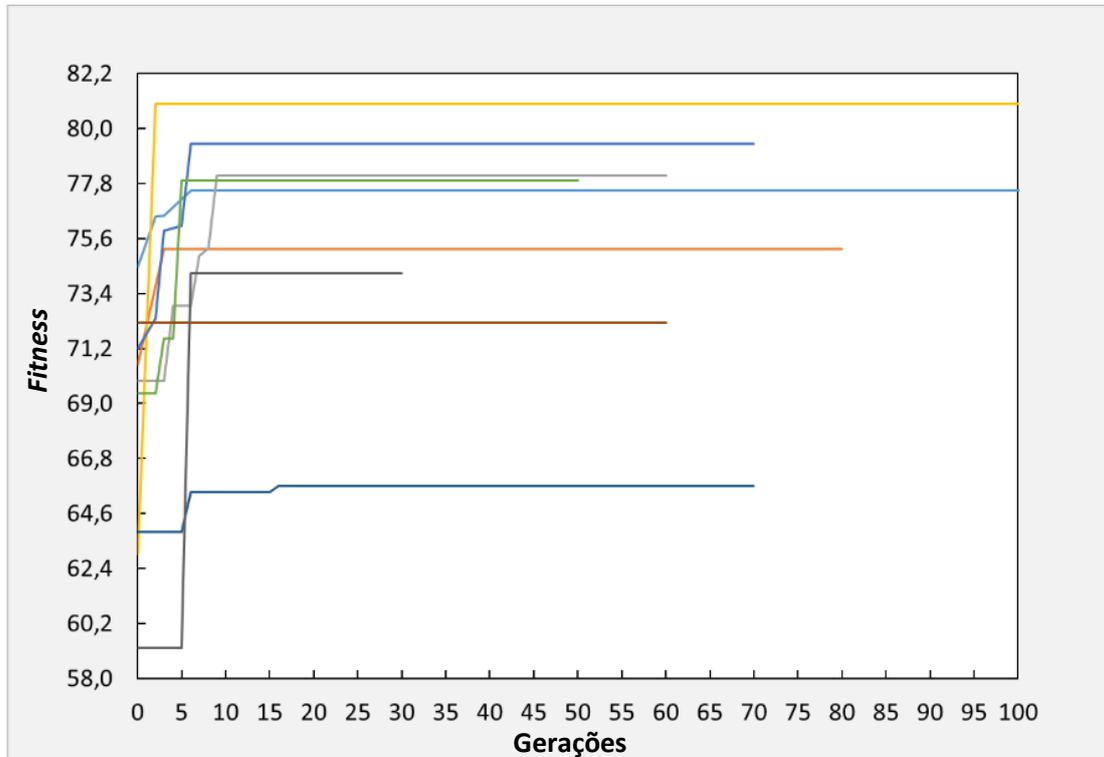
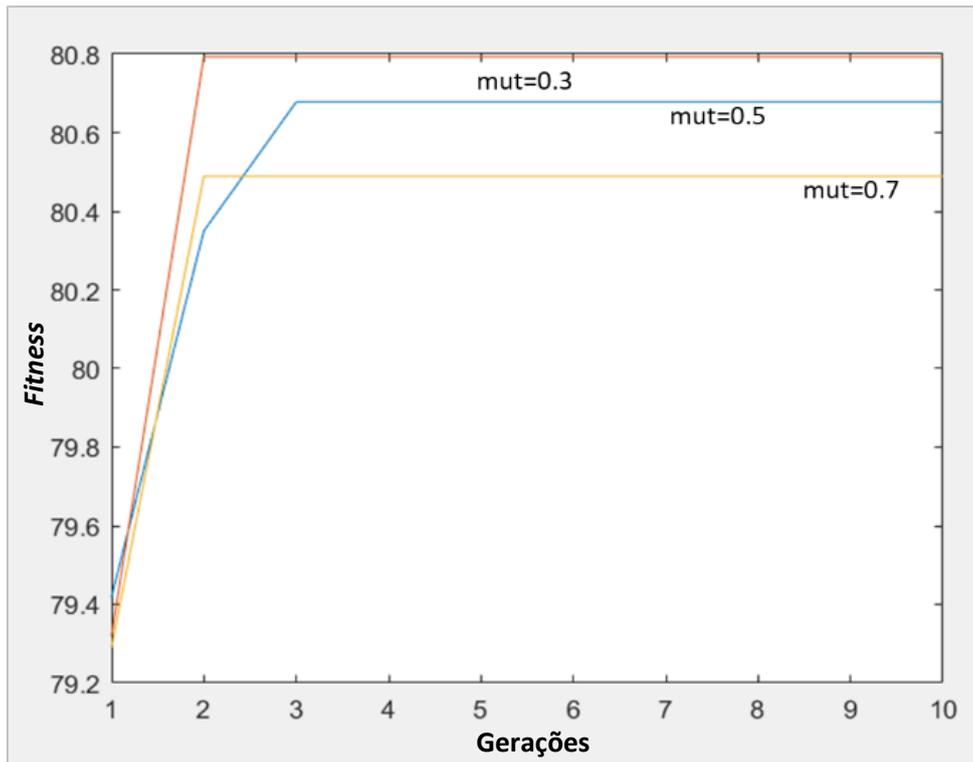
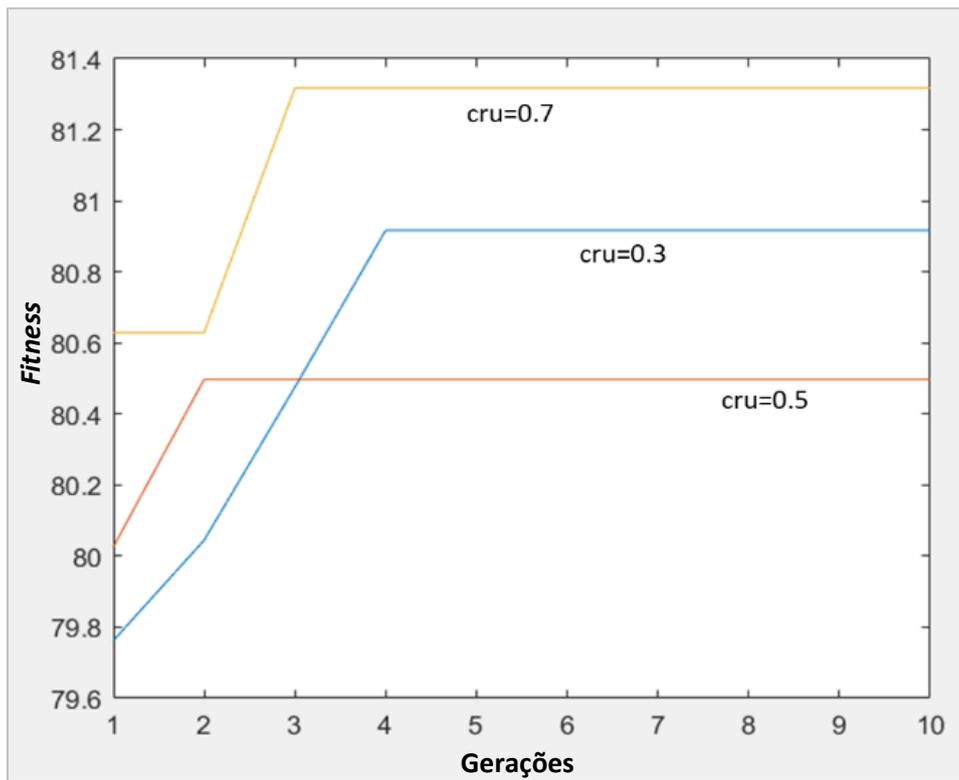


Figura 5.7 – Variação do valor da função fitness do indivíduo mais bem adaptado em função do número de gerações do *AG*, para uma população de 30 indivíduos

Continuando a busca pelo melhor conjunto de parâmetros do *AG*, nesses primeiros cenários, foi avaliado também a variação dos valores das taxas de cruzamentos e mutação (entre 0,3; 0,5 e 0,7). Com base nos valores utilizados em outras pesquisas deste tipo (Figura 5.8), foi possível observar que o comportamento do algoritmo foi melhor quando se utilizou uma menor taxa de mutação e uma maior taxa de cruzamento. A menor taxa de mutação permite evitar uma convergência prematura e a maior taxa de cruzamento permite ao algoritmo explorar uma solução mais global analisando todo o intervalo das soluções aceitáveis.



(a)



(b)

Figura 5.8 – Variação do valor da função fitness do AG em função da alteração da a) taxa de mutação e b) taxa de cruzamento, para uma população de 30 indivíduos e 10 gerações

Ao fim de todas essas análises, os parâmetros *AG* utilizados neste estudo incluíram número máximo de gerações de 15, tamanho populacional de 30, taxa de cruzamento de 0,7 e taxa de mutação de 0,3. Com essas opções de parâmetros o tempo de cálculo é de aproximadamente 5 horas por cada segmento, usando um computador Intel (R) Core (TM) i7-8750H CPU 2.20GHz e 8 GB de RAM, levando em consideração que o algoritmo se detém depois de fazer todas iterações consecutivas.

Depois de configurar o melhor algoritmo genético utilizado nessa pesquisa, a convergência do valor de adequação com as gerações para o segmento 1 é apresentado na Figura 5.9 e como pode ser observado, o valor de adequação do melhor conjunto de parâmetros altera continuamente porque o *AG* testa várias combinações de curvas, sendo que na medida que cresce a linha do gráfico, o *AG* seleciona o melhor grupo de curvas e elimina os grupos com menor convergência. No caso do segmento 1, o conjunto com o melhor valor de *fitness* (90,92) foi selecionado para representar as condições de tráfego daquele segmento.

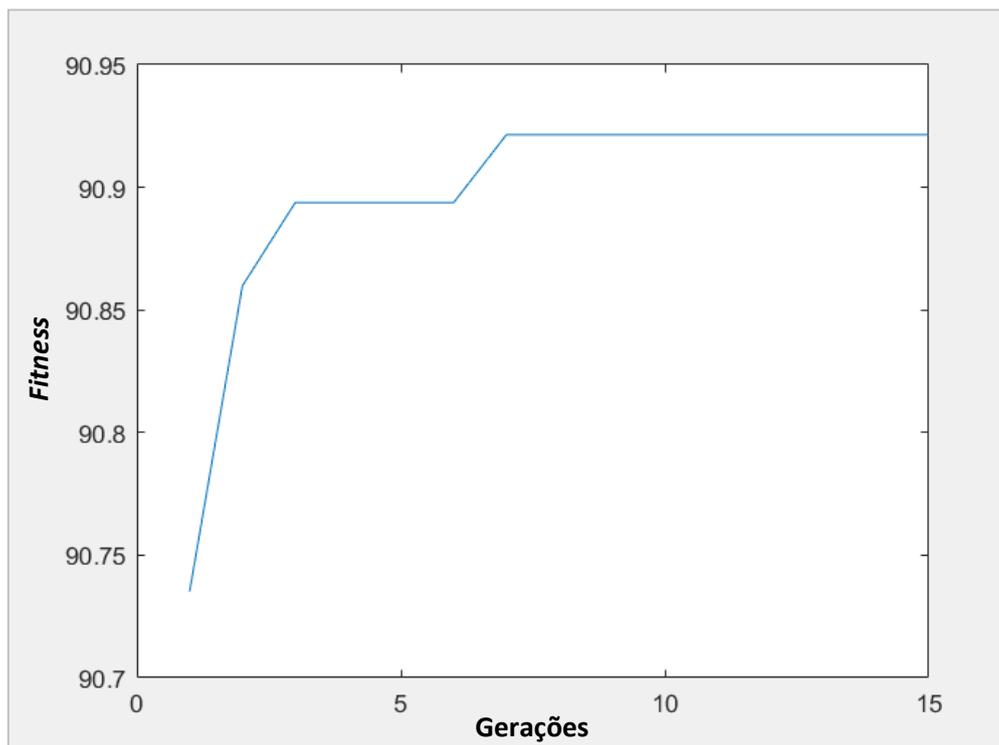


Figura 5.9 – Convergência do *fitness* do segmento 1 usando a Equação (4.6)

Com a implementação do *AG*, a melhor solução encontrada proporcionou um erro médio absoluto (*MAER*) de 3,28%, com *fitness* próximo de 92, para o segmento 2. Quando o melhor resultado da calibração foi aplicado para o conjunto de dados da validação, o *fitness* encontrado

foi igual a 83 e que representa um valor para *MAER* igual a 2,86%. A Tabela 5.1 mostra os erros médios absolutos encontrados para os dados da calibração e da validação quando o melhor conjunto de curvas de velocidade foi aplicado em cada segmento. Percebe-se que as variações absolutas dos erros obtidos para os 2 conjuntos de dados foram pequenas, em média 0,44%. A maior diferença absoluta foi de 1,5%, enquanto a menor foi de 0,14%.

Tabela 5.1 – Erros médios absolutos e valores de fitness obtidos a partir do *AG* para o conjunto de dados de calibração e validação

SEGMENTO	RODOVIA	CALIBRAÇÃO		VALIDAÇÃO	
		MAER	Fitness	MAER	Fitness
1	BR-020	3,770	90,921	4,614	79,902
2	BR-020	3,283	92,185	2,867	82,918
3	BR-020	4,707	85,301	3,601	71,157
4	BR-020	4,002	87,075	3,494	76,068
5	BR-040	3,867	90,863	4,830	79,490
6	BR-040	4,491	86,810	3,463	83,163
7	BR-060	3,541	87,491	3,208	79,768
8	BR-060	3,898	90,587	3,749	79,240
9	BR-060	4,389	88,183	3,311	83,283
10	BR-070	3,993	86,375	3,450	81,574
11	BR-070	4,062	87,331	3,691	82,240
12	BR-070	5,181	74,494	3,616	80,129

O Apêndice A descreve os arquivos de *MATLAB* empregados no *Vissim*, e os códigos de programação implementados para desenvolver o algoritmo genético.

5.2 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Ao término de todas as simulações com o *AG* nas etapas anteriores, foi possível identificar o melhor indivíduo do melhor cenário, ou seja, o melhor conjunto de curvas de velocidade desejada para cada segmento. Sendo assim foi possível comparar os valores registrados em campo (valores observados) com aqueles obtidos a partir da simulação. A Tabela 5.2 apresenta os valores de *MAER* encontrados para cada segmento e relaciona os resultados obtidos da primeira simulação (realizada com as curvas de velocidade padrão), com os resultados obtidos depois da calibração.

A partir da Tabela 5.2, percebeu-se que o erro proporcional absoluto médio foi reduzido para aproximadamente 11% com os valores das curvas otimizadas pelo algoritmo. Aferindo um menor erro percentual médio no início dos segmentos de 0,66% (MER_1) e um maior erro percentual médio de 10,83% no final dos segmentos (MER_2). Além disso, as diferenças produzidas pelo simulador calibrado com relação aos dados observados foram todas menores que 5,38% em todos os segmentos estudados.

Tabela 5.2 – Comparação de fluxos veiculares entre os valores observados e os valores simulados

SEGMENTO	RODOVIA	MER_1			MER_2		
		Antes da calibração	Depois da calibração	Δ	Antes da calibração	Depois da calibração	Δ
1	BR-020	2,08	2,39	0,30	17,34	5,19	-12,15
2	BR-020	4,77	2,48	-2,30	16,09	4,48	-11,61
3	BR-020	4,03	2,89	-1,14	17,59	3,75	-13,84
4	BR-020	1,52	1,58	0,06	11,88	3,53	-8,35
5	BR-040	2,87	2,23	-0,65	18,06	5,35	-12,70
6	BR-040	2,84	2,68	-0,16	17,19	3,86	-13,33
7	BR-060	2,05	1,73	-0,31	9,54	3,60	-5,94
8	BR-060	2,18	1,61	-0,57	11,45	4,23	-7,22
9	BR-060	3,62	1,46	-2,16	29,74	5,38	-24,36
10	BR-070	2,53	1,73	-0,81	15,53	5,11	-10,42
11	BR-070	1,22	1,34	0,12	10,02	4,49	-5,53
12	BR-070	2,86	2,57	-0,29	8,75	4,19	-4,57
Média	-	2,72	2,06	-0,66	15,27	4,43	-10,83

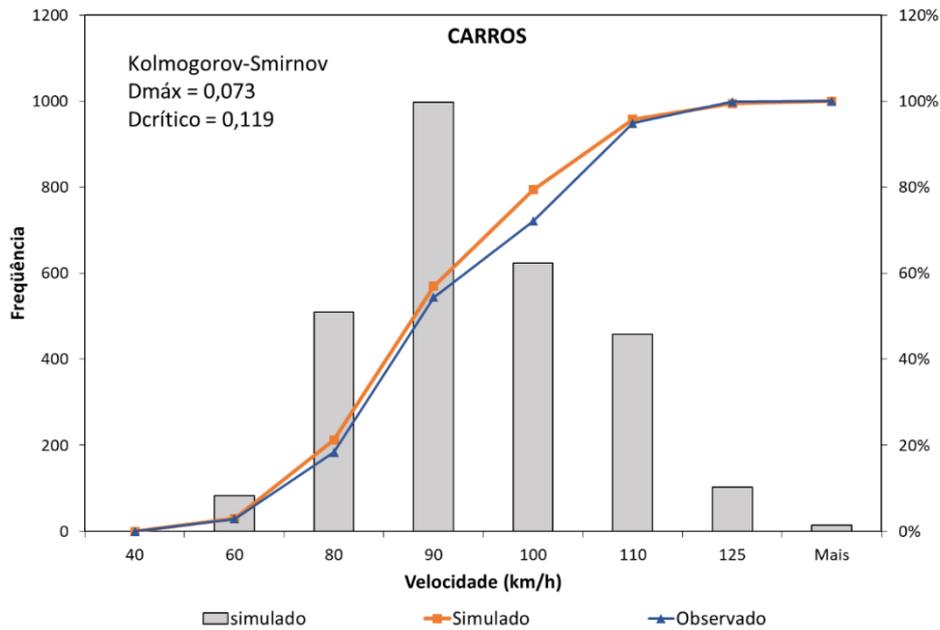
Os resultados da calibração das curvas de velocidade desejada, são apresentados por segmento para as quatro categorias veiculares simuladas (carros de passeio, ônibus, caminhões leves- $VC1$ e pesados- $VC2$), na Tabela 5.3. Os dados mostram que dos 48 resultados avaliados, apenas 9 tiveram a hipótese rejeitada, o que comprova que o algoritmo foi capaz de encontrar valores adequados para as curvas de velocidade dentro do modelo.

As curvas de velocidades que foram rejeitadas correspondem ao tipo de veículo de carros de passeio, sendo os de maior frequência para este tipo de rodovias. A máxima diferença encontrada foi 0,189 no segmento 12 e de 0,113 no segmento 2. Deve-se ressaltar que o algoritmo genético foi projetado para minimizar as diferenças entre as distribuições de velocidade da corrente de tráfego simulado e da corrente de tráfego observado. Portanto, é possível que a solução encontrada produza distribuições de velocidade ligeiramente diferentes das observadas na realidade.

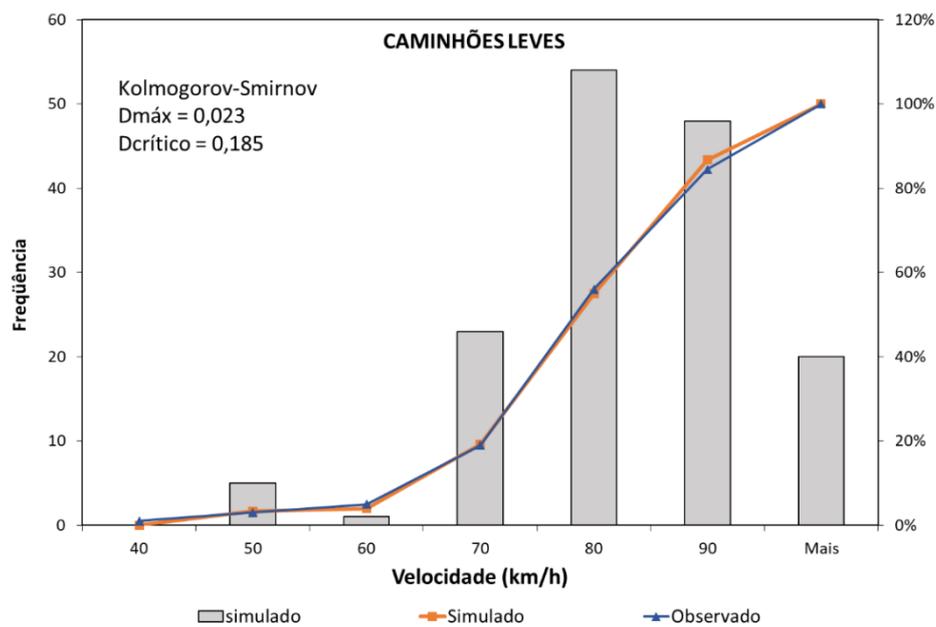
Tabela 5.3 – Resultado da calibração das curvas de velocidade desejadas

Segmento	Rodovia	Categoria	$D_{critico}$	D_{max}	Teste hipótese
1	BR-020	Carros	0,0327	0,1194	Não Rejeitada
		Ônibus	0,0321	0,2551	Não Rejeitada
		VC1	0,0291	0,1851	Não Rejeitada
		VC2	0,0386	0,2037	Não Rejeitada
2	BR-020	Carros	0,0787	0,0873	Não Rejeitada
		Ônibus	0,0171	0,2127	Não Rejeitada
		VC1	0,0410	0,1342	Não Rejeitada
		VC2	0,2083	0,2489	Não Rejeitada
3	BR-020	Carros	0,1465	0,1120	Rejeitada
		Ônibus	0,1288	0,4574	Não Rejeitada
		VC1	0,2140	0,2142	Não Rejeitada
		VC2	0,2272	0,2423	Não Rejeitada
4	BR-020	Carros	0,1174	0,0776	Rejeitada
		Ônibus	0,2780	0,3461	Não Rejeitada
		VC1	0,2127	0,2330	Não Rejeitada
		VC2	0,1991	0,3050	Não Rejeitada
5	BR-040	Carros	0,2315	0,1429	Rejeitada
		Ônibus	0,0443	0,2937	Não Rejeitada
		VC1	0,0166	0,1973	Não Rejeitada
		VC2	0,1957	0,2050	Não Rejeitada
6	BR-040	Carros	0,0337	0,0902	Não Rejeitada
		Ônibus	0,1948	0,2656	Não Rejeitada
		VC1	0,0166	0,1973	Não Rejeitada
		VC2	0,1957	0,2050	Não Rejeitada
7	BR-060	Carros	0,2216	0,0849	Rejeitada
		Ônibus	0,2109	0,2783	Não Rejeitada
		VC1	0,2605	0,1951	Rejeitada
		VC2	0,2264	0,2312	Não Rejeitada
8	BR-060	Carros	0,2172	0,0866	Rejeitada
		Ônibus	0,2640	0,6253	Não Rejeitada
		VC1	0,1696	0,1750	Não Rejeitada
		VC2	0,1836	0,2170	Não Rejeitada
9	BR-060	Carros	0,1741	0,2271	Não Rejeitada
		Ônibus	0,0643	0,5480	Não Rejeitada
		VC1	0,2161	0,1984	Rejeitada
		VC2	0,2937	0,3274	Não Rejeitada
10	BR-070	Carros	0,0172	0,1275	Não Rejeitada
		Ônibus	0,0938	0,3174	Não Rejeitada
		VC1	0,0131	0,1668	Não Rejeitada
		VC2	0,0538	0,2209	Não Rejeitada
11	BR-070	Carros	0,0945	0,0711	Rejeitada
		Ônibus	0,0777	0,2434	Não Rejeitada
		VC1	0,1770	0,1997	Não Rejeitada
		VC2	0,1374	0,4089	Não Rejeitada
12	BR-070	Carros	0,2323	0,0668	Rejeitada
		Ônibus	0,1198	0,1908	Não Rejeitada
		VC1	0,0963	0,2647	Não Rejeitada
		VC2	0,0779	0,2623	Não Rejeitada

A comparação da distribuição de velocidade de carros de passeio observada no segmento 1 com o resultado das distribuições do simulador, apresentado na Figura 5.10, mostra que as distribuições de velocidade calibradas baseadas no AG, são muito próximas as observadas para este tipo de veículo, demonstrando a importância da calibração para o modelo de simulação microscópico.

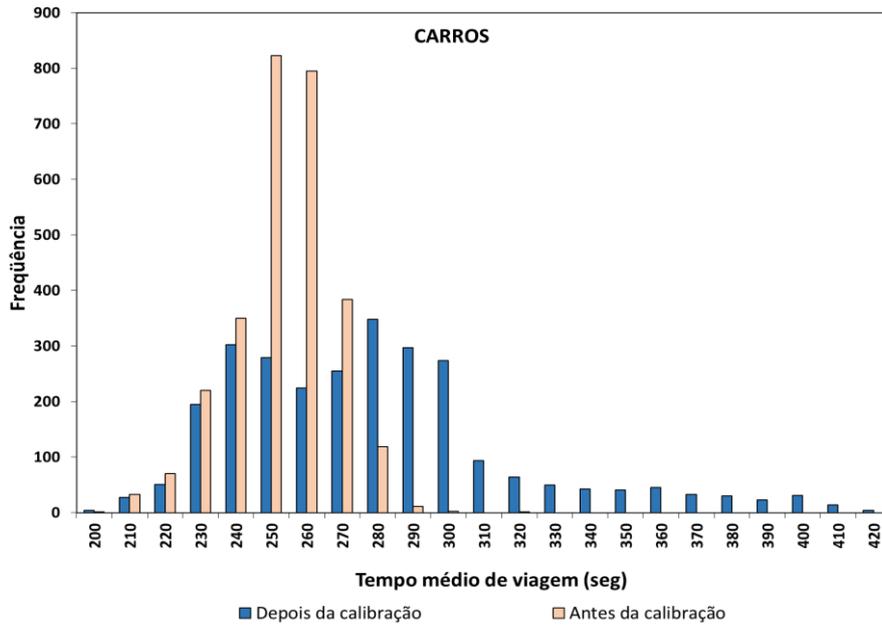


(a) carros de passeio

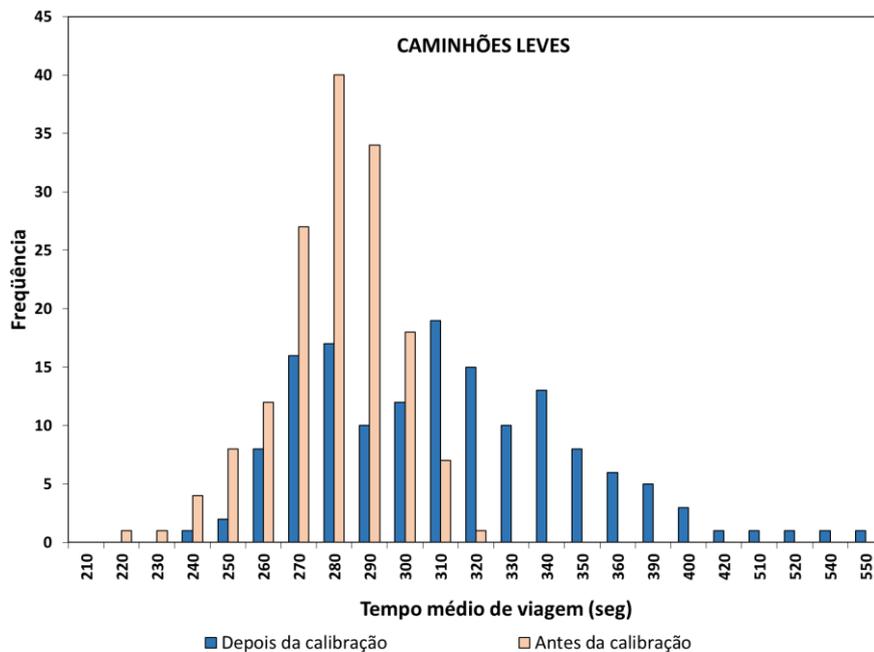


(b) caminhões leves

Figura 5.10 – Distribuição de velocidades para o segmento 1



(a) carros de passeio



(b) caminhões leves

Figura 5.11 – Comparação de tempos médios de viagem para o segmento 1, antes e depois da calibração

Comparando os tempos de viagem obtidos depois da calibração para os carros de passeio do segmento 1 com os resultados da simulação antes da calibração, na Figura 5.11, inicialmente os tempos de viagem foram estimados num intervalo de 210 e 290 segundos e depois da calibração os intervalos de tempos de viagem atingiram até 420 segundos. No caso dos caminhões leves, pelo efeito da calibração, são estimados tempos de viagem com uma maior

distribuição, com tempos de viagem entre 220 a 550 segundos. A partir desta análise estima-se que os modelos não calibrados geram tempos de viagem muito mais curtos que os observados em campo.

Os resultados das distribuições de velocidade e tempos de viagem para cada segmento são apresentados no Apêndice B. Todos esses resultados indicam que os parâmetros calibrados com o algoritmo genético conseguiram reproduzir o tráfego adequadamente, quando comparados os resultados do simulador sem calibração (valores padrão).

5.3 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO VISSIM

Uma vez que os parâmetros de distribuição das curvas de velocidades foram otimizados para produzir o melhor ajuste entre os dados observados e simulados, a validação do modelo foi abordada.

A validação estatística do modelo de simulação foi baseada nos valores de *MAER* encontrados para cada segmento, com um novo conjunto de dados de campo em condições não experimentadas. Foram realizadas comparações dos valores fornecidos pelo Vissim e os coletados em campo de fluxo veicular e de tempo médio de viagem.

Tabela 5.4 – Comparação entre os erros médios absolutos obtidos a partir do *AG* para os conjunto de dados da calibração e da validação

SEGMENTO	RODOVIA	<i>MER</i> ₁			<i>MER</i> ₂		
		Calibração	Validação	Δ	Calibração	Validação	Δ
1	BR-020	2,39	2,58	0,19	5,19	8,78	3,58
2	BR-020	2,48	2,09	-0,38	4,48	8,37	3,89
3	BR-020	2,89	2,43	-0,47	3,75	3,32	-0,43
4	BR-020	1,58	1,17	-0,40	3,53	4,56	1,03
5	BR-040	2,23	2,90	0,68	5,35	6,59	1,24
6	BR-040	2,68	1,80	-0,87	3,86	4,24	0,38
7	BR-060	1,73	1,50	-0,23	3,60	5,06	1,46
8	BR-060	1,61	1,63	0,02	4,23	4,86	0,63
9	BR-060	1,46	0,93	-0,53	5,38	6,51	1,14
10	BR-070	1,73	2,08	0,35	5,11	4,35	-0,77
11	BR-070	1,34	2,55	1,21	4,49	4,51	0,02
12	BR-070	2,57	2,00	-0,57	4,19	4,02	-0,17
Média	-	2,06	1,97	-0,08	4,43	5,43	1,00

$\Delta = \text{valor calibração} - \text{valor validação}$

Tabela 5.5 – Diferença entre valores simulados e observados do tempo médio de viagem, na fase de validação do Vissim

SEGMENTO	RODOVIA	CATEGORIA DE VEÍCULO	TEMPO MÉDIO DE VIAGEM (Segundos)		
			Simulado	Observado	Dif
1	BR-020	Carros	292,97	270,30	0,08
		Ônibus	351,70	318,48	0,10
		VC1	333,15	305,21	0,09
		VC2	340,26	335,45	0,01
2	BR-020	Carros	291,44	251,74	0,16
		Ônibus	398,32	352,07	0,13
		VC1	390,44	352,08	0,11
		VC2	504,74	537,74	0,06
3	BR-020	Carros	329,86	305,56	0,08
		Ônibus	433,32	385,79	0,12
		VC1	419,26	389,54	0,08
		VC2	416,82	437,86	0,05
4	BR-020	Carros	336,29	351,43	0,04
		Ônibus	437,08	419,61	0,04
		VC1	466,21	451,12	0,03
		VC2	426,47	481,14	0,11
5	BR-040	Carros	236,42	231,10	0,02
		Ônibus	332,96	303,97	0,10
		VC1	270,72	275,21	0,02
		VC2	302,42	292,15	0,04
6	BR-040	Carros	198,23	188,74	0,05
		Ônibus	250,07	248,17	0,01
		VC1	231,17	225,78	0,02
		VC2	253,61	247,11	0,03
7	BR-060	Carros	245,50	266,67	0,08
		Ônibus	324,10	313,19	0,03
		VC1	318,10	343,07	0,07
		VC2	338,08	382,03	0,12
8	BR-060	Carros	245,21	272,11	0,10
		Ônibus	354,82	381,50	0,07
		VC1	339,39	365,29	0,07
		VC2	351,54	390,96	0,10
9	BR-060	Carros	300,46	280,92	0,07
		Ônibus	345,29	302,18	0,14
		VC1	483,27	457,46	0,06
		VC2	584,09	565,11	0,03
10	BR-070	Carros	141,75	139,50	0,02
		Ônibus	211,39	205,76	0,03
		VC1	204,01	209,09	0,02
		VC2	236,61	233,60	0,01
11	BR-070	Carros	195,47	184,55	0,06
		Ônibus	217,83	209,97	0,04
		VC1	220,18	234,18	0,06
		VC2	233,31	241,41	0,03
12	BR-070	Carros	180,14	164,20	0,10
		Ônibus	183,81	206,43	0,11
		VC1	187,23	230,63	0,19
		VC2	183,70	195,23	0,06
Média	-	-	-	-	0,07

$$Dif = \frac{|Observado - Simulado|}{Observado}$$

A Tabela 5.4 apresenta os erros absolutos médios (*MAER*) estimados para os fluxos de veículos na entrada e na saída de cada segmento.

Na validação, o erro absoluto médio entre os valores de entrada e saída para cada segmento foi menor do que 1,46%, e quando comparado com o sistema calibrado, correspondente a uma redução de 0,08% no erro dos valores de MER_1 , e um aumento de 1,0% nos valores da saída dos segmentos MER_2 .

A Tabela 5.5 mostra as diferenças entre os valores simulados e observados na fase de validação do Vissim. Os valores simulados correspondem as médias dos tempos de viagem para cada categoria de veículo, a diferença entre o valor simulado e o observado variou entre 2% e 19%, com uma diferença média de 7%. Os tipos de veículo com maior diferença de tempo de viagem correspondem a caminhões leves para o segmento 12 e carros de passeio para o segmento 2.

O resultado da validação do Vissim evidenciou a eficiência do AG para a calibração de modelos de simulação. A Tabela 5.6 mostra os valores calibrados das curvas de distribuição de velocidade desejada para cada categoria de veículo do segmento 1. As informações referentes aos outros segmentos são apresentadas no Apêndice B.

Tabela 5.6 – Velocidade desejada de cada categoria de veículos no segmento 1

CARROS DE PASSEIO		ÔNIBUS		CAMINHÕES LEVES		CAMINHÕES PESADOS	
Velocidade (km/h)	Frequência Relativa	Velocidade (km/h)	Frequência Relativa	Velocidade (km/h)	Frequência Relativa	Velocidade (km/h)	Frequência Relativa
40	0,0000	30	0,0000	30	0,0000	30	0,0000
60	0,0290	40	0,0188	40	0,0100	40	0,0125
80	0,1840	50	0,0371	50	0,0300	50	0,0250
90	0,5440	60	0,0886	60	0,0500	60	0,0500
100	0,7210	70	0,2590	70	0,1900	70	0,1200
110	0,9490	80	0,7590	80	0,5600	80	0,5300
125	0,9990	90	0,9630	90	0,8450	90	0,8310
150	1,0000	100	1,0000	100	1,0000	100	1,0000

Os resultados da validação mostram que as diferenças entre os valores simulados e observados, são baixos, podendo, portanto, ser considerados satisfatórios, indicando um ajuste geral razoável e uma boa capacidade de replicar a variabilidade espacial e temporal dos dados,

podendo considerar que o modelo de simulação calibrado é capaz de representar adequadamente a operação de uma rodovia de pista dupla do Distrito Federal e seu entorno.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de calibração utilizando algoritmos genéticos (AG) mostrou-se bastante eficiente para este tipo de rodovias no simulador Vissim. Comparando-se as velocidades médias desejadas encontradas pelo AG com os valores recomendados no simulador Vissim, verificou-se que as velocidades médias desejadas nas rodovias estudadas são menores que as velocidades sugeridas pelo simulador e variam de uma rodovia para outra, o que indica que essas velocidades são as que os veículos conseguem desenvolver em função das suas limitações de desempenho.

Para a validação do modelo calibrado foi usado um segundo conjunto de dados coletados nos 12 segmentos. A diferença média de tempos de viagem encontrada na validação foi de 7%, mostrando que os tempos médios de viagem simulados estão dentro das distribuições dos tempos viagem observados em campo, indicando que as curvas de velocidade desejada para cada tipo de veículo obtidas por meio do AG, foram bem calibradas.

Como essas diferenças foram consideradas suficientemente pequenas, o modelo do Vissim calibrado foi considerado capaz de reproduzir o comportamento do tráfego em uma rodovia tipicamente dividida e de pista dupla brasileira no Distrito Federal e seu entorno.

Os resultados da determinação das velocidades desejadas para cada categoria de veículos, demonstraram ter valores diferentes em cada rodovia simulada. Os valores para carros de passeio oscilam entre 40 e 160 km/h, os ônibus entre 30 e 120 km/h, os caminhões leves entre 20 e 130 km/h e os caminhões pesados entre 20 e 120 km/h. Ressaltando que as velocidades estimadas nos segmentos suburbanos na maioria dos casos foram menores que as velocidades estimadas para os segmentos rurais.

Por fim, os fatores mais importantes para o bom desempenho do modelo de simulação Vissim são os parâmetros de seguimento (*car-following*), de mudança de faixa (*lane-change*) e principalmente, a calibração das distribuições de velocidade desejadas dos veículos. Para cenários de simulação com baixas e médias intensidades de fluxo, os parâmetros de calibração

demonstraram pouca influência na modelagem, pois nestas condições, os veículos trafegam na maior parte do tempo com bastante liberdade, permitindo aos condutores imprimir velocidades próximas da desejada. Para altos volumes, os parâmetros de calibração possuem influência significativa na modelagem, principalmente na capacidade e na representação das trocas de faixa.

6 MODELO DE RELAÇÃO DE FLUXO E VELOCIDADE

Um dos objetivos desta pesquisa foi determinar um modelo de relação de fluxo e velocidade para rodovias de pista dupla em áreas suburbanas e rurais do Distrito Federal, que represente as condições de fluxo livre e as condições com fluxo não congestionado nas rodovias estudadas.

Os principais aspectos a serem adaptados são as relações fluxo-velocidade, incluindo as condições básicas e a capacidade. A calibração das relações velocidade-fluxo tem sido mais lenta devido à falta de dados de tráfego adequados (BESSA JR., 2015). A fim de evitar isso, para a geração de modelos de tráfego, foram utilizados equipamentos de controle de velocidade, esperando produzir modelos de tráfego que se adequassem melhor às condições do campo, visto que os dados coletados não fornecem informações com taxas de fluxo que variem desde o fluxo zero até a capacidade.

Para atingir esse objetivo, foi necessário reproduzir vários experimentos com a ajuda do simulador Vissim já calibrado em cada segmento estudado no entorno de Brasília, que permitiram obter novos valores aos desenvolvidos no HCM, estimando taxas de velocidade de fluxo livre (*FFS*), identificando o evento em que a velocidade da corrente de tráfego começa a decrescer (*BP*), a taxa de fluxo antes e depois do *BP*, assim como também o valor da densidade na capacidade (D_C), que reflete a capacidade (C) e a velocidade na capacidade (CS), para obter um conjunto de curvas fluxo-velocidade para os segmentos estudados.

6.1 DADOS DE TRÁFEGO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE VELOCIDADE

Dados de contagens de tráfego provenientes de equipamentos de controle de velocidade nas rodovias federais brasileiras do Distrito Federal, foram obtidos através do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que forneceu o banco de dados do Programa Nacional de Controle Velocidade (PNCV).

Esses equipamentos caracterizam-se por conter um dispositivo receptor com laços indutivos e sensores *piezo* elétricos enterradas no revestimento do pavimento, que permitem coletar informação diária de fluxo de tráfego, classificado em quatro classes: motos; carros e veículos

pequenos; caminhões leves e ônibus; e caminhões pesados e especiais. Importante ressaltar que os equipamentos se encontraram localizados no início e/ou no final de cada segmento (Figura 6.1).

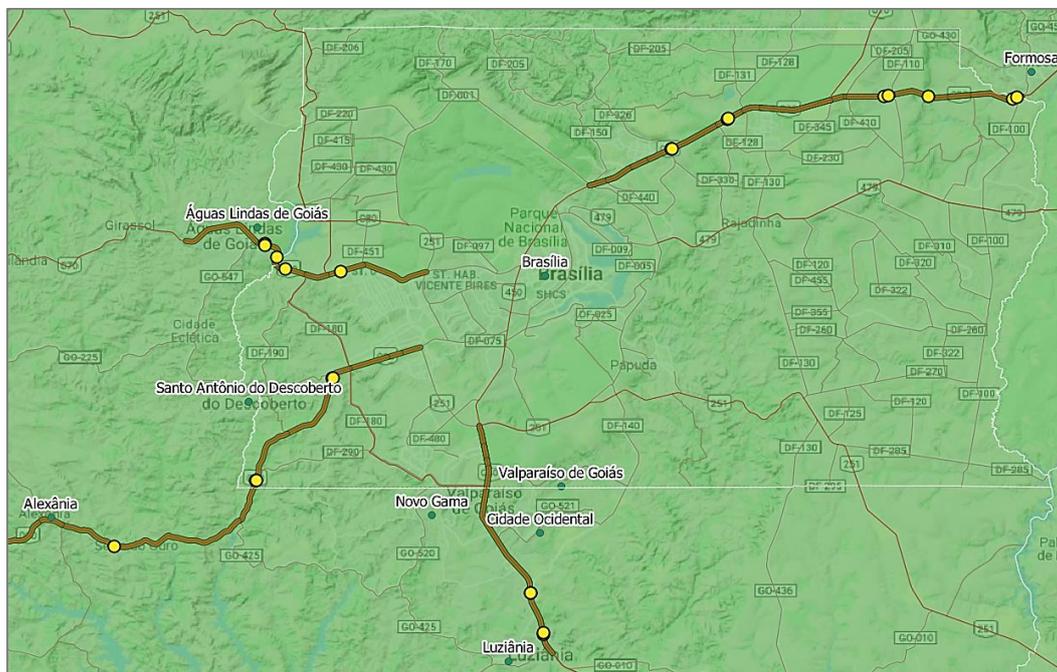


Figura 6.1 – Localização dos equipamentos PNCV próximos aos segmentos de estudo

Tabela 6.1 – Equipamentos de coleta utilizados

SEG.	RODOVIA/UF	DESCRIÇÃO	INICIAL		FINAL	
			KM	Equipamento	KM	Equipamento
1	BR-020/DF	Acesso II Sobradinho, SNV: 8,4 km inicial - 22,6 km final BR-020/DF	11,4	DFB00229030	19,6	DFB00229060
2			19,19	DFB00229050	11,4	DFB00229040
3	BR-020/DF	SNV: 36,39 km inicial - 57,89 km final BR-020/DF	40,29	DFR00229090	57,2	DFB00229110
4			57,89	DFB00229120	41,0	DFR00229100
5	BR-040/GO	Luziânia, SNV: 0,0 km inicial - 24,1 km final BR-040/GO	16,1	GOB00176070	21,94	GOR00176080
6			21,8	GOR00172090	16,0	GOB00177050
7	BR-060/DF	SNV: 9,4 km inicial - 31,3 km final BR-060/DF	12,3	DFB00184090	30,0	DFB00196040
8			30,0	DFB00196050	12,3	DFB00196030
9	BR-060/GO	SNV: 4,8 km inicial - 30,39 km final BR-060/GO	22,69	GOB00199040	-	-
10			22,8	GOB00199050	-	-
11	BR-070/DF/GO	SNV: 8,19 km inicial - 1,8 km final BR-070/DF SNV: 0,0 km inicial - 4,0 km final BR-070/GO	19,3	DFR00521010	4,0	GOR00308010
12			4,0	GOR00308020	11,75	DFR00513010

Fonte: adaptado de SNV (2019).

Para facilitar o acesso da informação, os dados de contagem foram organizados e agrupados por dia, em períodos de 15 minutos ou 1 hora para cada um dos segmentos, fornecendo uma amostra de mais de 2 milhões de registros, coletados entre janeiro e dezembro do 2017. A Tabela 6.1 fornece a localização dos equipamentos utilizados.

6.1.1 Filtros para a determinação do volume diário médio anual

Para a determinação do volume diário médio anual e permitir avaliar em princípio o que ocorre na maior parte do tempo nas rodovias, foram utilizados os seguintes critérios para determinar o volume de tráfego, com base nos dados de tráfego do ano 2017 disponibilizadas pelo DNIT.

O primeiro critério foi desconsiderar as datas festivas que alteram o tráfego veicular, o segundo critério foi desconsiderar a circulação das motos que não ocorrem da mesma forma que os outros veículos, o terceiro critério, baseado no comportamento semelhante do fluxo de tráfego durante a semana, foi considerar os dias de terças, quartas e quintas-feiras (CUNHA, 2007). Assim finalmente foram utilizadas informações de estações meteorológicas (próximas a cada segmento) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para determinar os dias com precipitações, para desconsiderar os dias com condições climáticas com chuva que influenciam o comportamento dos motoristas.

Após a aplicação, na sequência dos filtros anteriores, foram descartados os dados inconsistentes captados pelos equipamentos. Como qualquer dispositivo eletrônico, os sensores estão sujeitos a falhas de funcionamento (ANDRADE, 2012) e elas podem acarretar a captação de informações que não refletem as condições de tráfego, como ausência de informação e valores negativos de contagem.

Com essa análise, obteve-se a variação média do comportamento do tráfego em um dia útil típico em cada segmento. A Figura 6.2 ilustra o segmento 2, exemplo de um segmento numa área suburbana próximo a cidade de Brasília, e a Figura 6.3 ilustra o segmento 3, exemplo de um segmento numa área rural. No Apêndice C são apresentados os dias úteis típicos para os demais segmentos analisados.

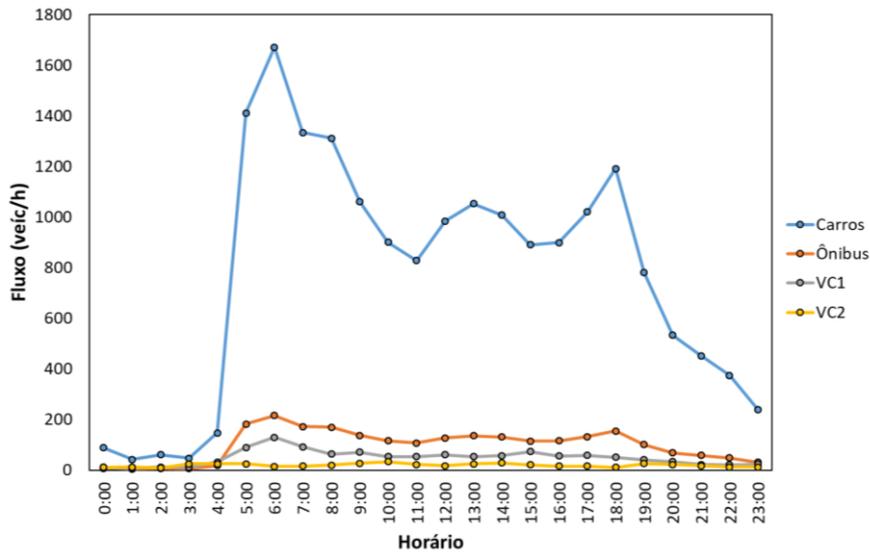


Figura 6.2 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 2

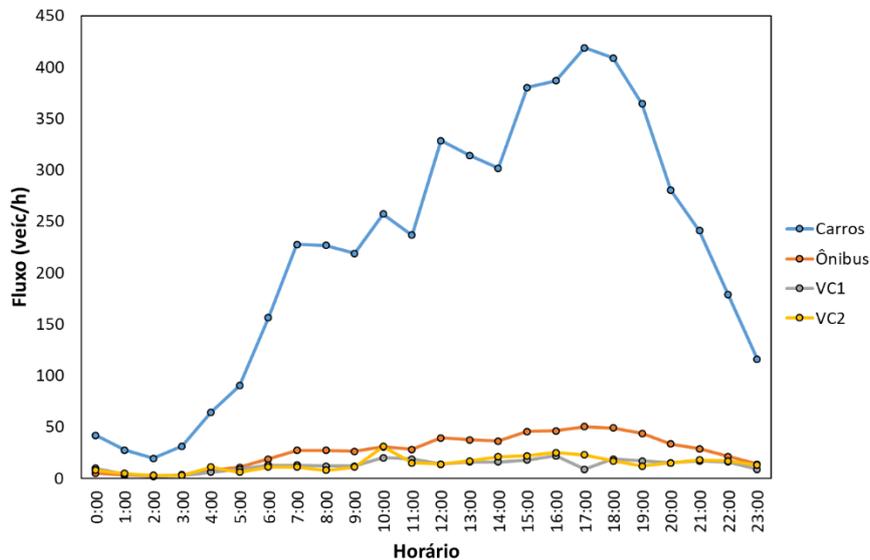


Figura 6.3 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 3

Em cada segmento, nota-se que as maiores participações de veículos correspondem aos carros de passeio, com fluxos de hora pico de 1.600 veíc/h no período da manhã no segmento suburbano e de 420 veíc/h no horário da tarde no segmento rural. Entretanto, o tráfego de ônibus e caminhões é constante durante o dia, principalmente no horário de 6:00 h e 18:00 h como mostram as Figura 6.2 e 6.3.

A Figura 6.4 apresenta a composição média do tráfego durante o ano de 2017 para cada um dos segmentos estudados. Os carros de passeio compõem a maior parte do fluxo de veículos, seguido pelos ônibus e pelos caminhões. Os segmentos possuem composições com um padrão

semelhante, com exceção dos segmentos 11 e 12 que apresentam 0,4 % de caminhões pesados divergindo um pouco dos outros. A porcentagem média de veículos pesados no tráfego apresentou valores entre 9% e 26%, com os maiores valores nos segmentos 5 e 6.

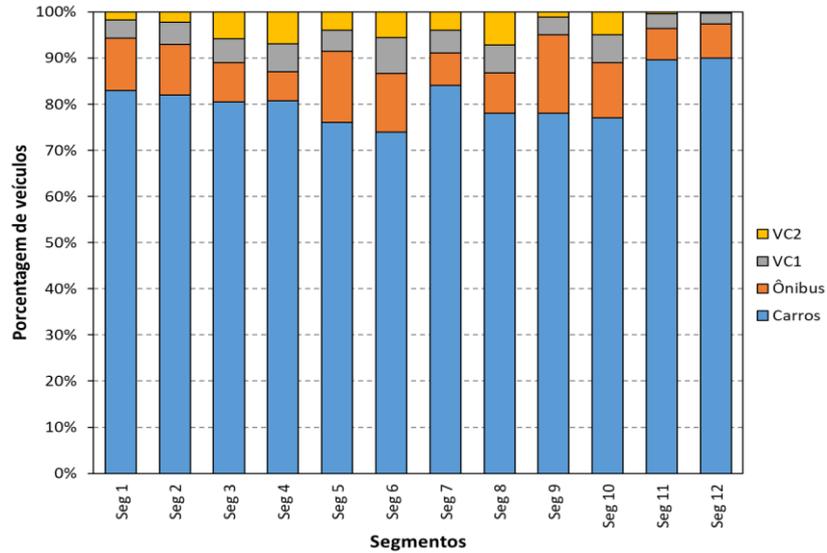


Figura 6.4 – Composição média do tráfego em 2017 nos segmentos rodoviários estudados

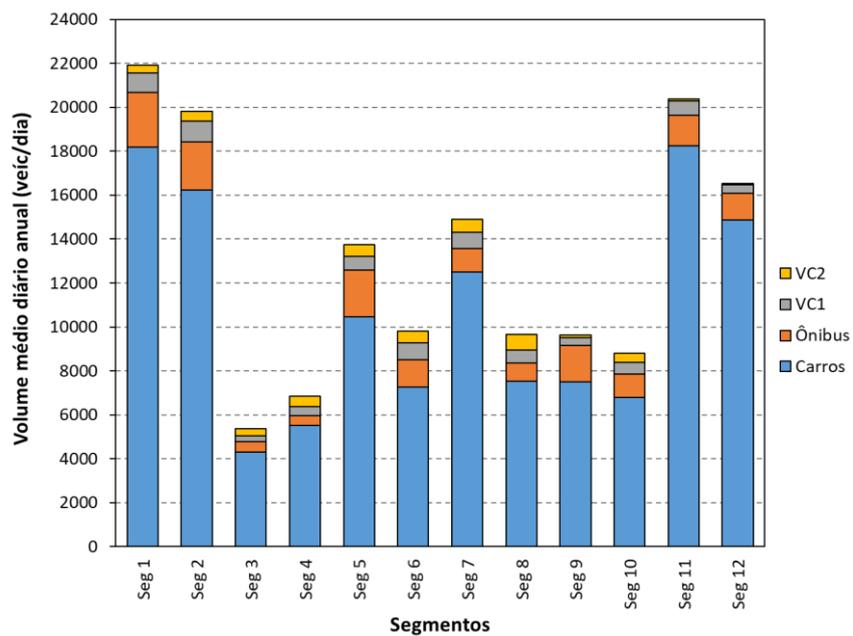


Figura 6.5 – Volume médio diário anual para cada segmentos

Apesar da composição veicular dos 12 segmentos serem semelhantes, há uma divergência na intensidade do tráfego observado, como pode ser visto na Figura 6.5. O volume médio diário anual (VMDA) variou entre 14.000 e 21.000 veic/dia para os segmentos adjacentes a áreas

suburbanas e para segmentos em áreas rurais entre 5.000 e 14.000 veíc/dia, apresentando maiores volumes nos segmentos mais próximos às áreas urbanas e menores à medida que os segmentos ficam mais distantes destas.

Este conjunto de dados permitiu que o modelo do Vissim já calibrado, tornasse o simulador mais representativo para modelar condições de tráfego das rodovias. No item a seguir, são apresentados os resultados do modelo para representar as variações do tráfego.

6.2 ESTIMATIVAS DO MODELO VISSIM PARA A DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES DE TRÁFEGO DE FLUXO LIVRE

A estimativa das condições de tráfego através do modelo Vissim para representar o modelo fluxo-velocidade do HCM que admite um intervalo de fluxo de tráfego no qual a velocidade média dos veículos de passeio se mantém igual a velocidade de fluxo livre (*FFS*). Foi necessário delimitar a rede simulada de cada segmento de forma separada e posteriormente com dados de entrada de contagens de tráfego (de veículos leves), foram realizados vários processos simulações que representassem as condições de fluxo livre. Condições de fluxo verificadas mediante as análises das medidas de desempenho de tempo de viagem e volume de veículos.

O modelo fluxo-velocidade do HCM admite um intervalo de fluxo de tráfego no qual a velocidade média dos veículos de passeio se mantém igual a velocidade de fluxo livre (*FFS*). Para conseguir representar esse comportamento o método desenvolvido consistiu em reproduzir no modelo de simulação os volumes diários de cada segmento, em intervalos de 5 minutos e em períodos de 24 horas. Posteriormente com os resultados obtidos de volumes e tempos de viagem, foram realizados gráficos de fluxo e velocidade, que permitissem visualizar a transição entre o fluxo livre para o início do congestionamento.

As curvas de fluxo-velocidade, Figura 6.6 e Figura 6.7, mostram os resultados de velocidade e taxa de fluxo dos segmentos 1 e 3, obtidas após do tratamento dos dados, sendo o fluxo de tráfego representado em carros de passeio (cp/h/faixa) e a velocidade em quilômetros por hora (km/h). A Figura 6.6 consiste num segmento suburbano, onde é possível notar que as velocidades médias mantem-se num intervalo de 40 km/h até 120 km/h com uma queda da velocidade mais progressiva comparado com a Figura 6.7, que representa um segmento rural

com velocidades médias acima de 140 km/h por um amplo intervalo de fluxo de tráfego que posteriormente tem uma queda mais definida na velocidade média em função do aumento do volume de tráfego.



Figura 6.6 – Curva de Fluxo-velocidade do segmento 1

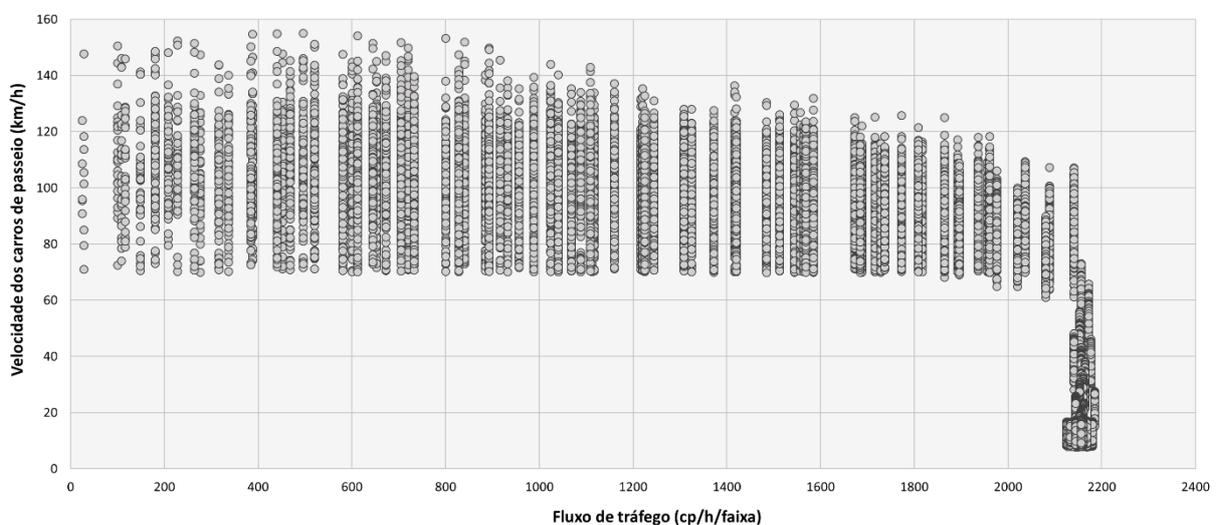


Figura 6.7 – Curva de Fluxo-velocidade do segmento 3

As curvas de fluxo-velocidade, não evidenciam claramente o ponto de transição (*BP*) que consiste no fluxo a partir do qual a velocidade média da corrente de tráfego decresce em função do aumento no fluxo de tráfego. Para a estimativa de um valor de velocidade que defina o ponto de transição, foi empregada a metodologia de Andrade (2012), que consiste em avaliar o desvio padrão (σ) das velocidades medidas em torno da velocidade de fluxo livre (*FFS*), para

determinar o intervalo da curva que a velocidade se mantém constante e igual a velocidade de *FFS*, Equação (6.1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - FFS_{int})^2} \quad (6.1)$$

Onde:

σ = desvio padrão;

S_i = velocidade observada;

FFS_{int} = média de velocidades de fluxo livre dentro de cada intervalo;

N = número total de observações de velocidade por intervalo de fluxo.

Inicialmente foram calculadas as médias das velocidades observadas para cada segmento a intervalos de 50 cp/h/faixa e posteriormente realizou-se as curvas de fluxo-velocidade, para poder determinar de forma aproximada até que ponto as velocidades se encontram invariáveis com o aumento do volume de tráfego.

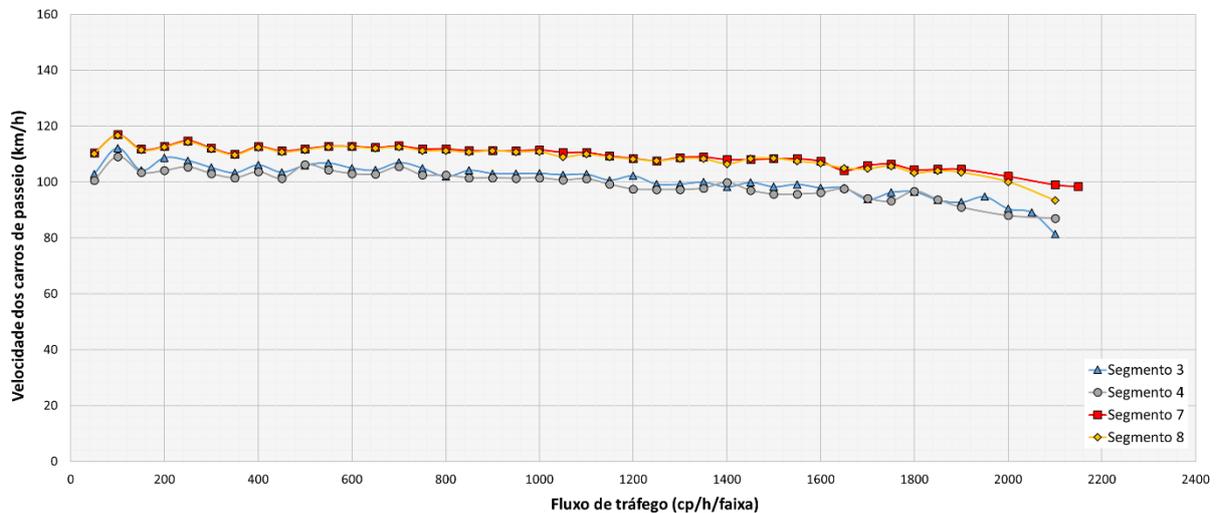


Figura 6.8 – Média das velocidades dos segmentos rurais

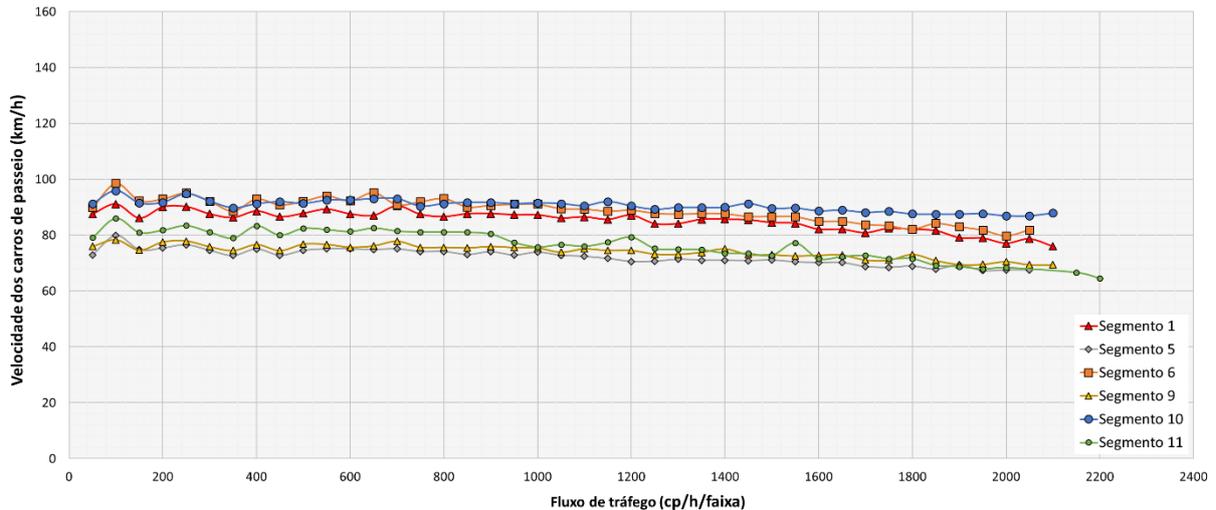


Figura 6.9 – Média das velocidades dos segmentos suburbanos

As Figura 6.8 e 6.9 apresentam as observações de cada segmento rodoviário, em regiões rurais e regiões suburbanas, que permitiram verificar a existência de um intervalo de velocidades constante até aproximadamente 700 cp/h/faixa, onde começa a ter uma queda na velocidade, a partir do qual ela decresce em função do fluxo de tráfego. Desta forma, foi calculada a velocidade média de fluxo livre (FFS_{int}) para intervalos de 50 cp/h/faixa, para a determinação do desvio padrão das velocidades observadas em relação da FFS de cada intervalo.

Os desvios padrão das velocidades observadas não variaram mais de 2,0 ou 3,0 km/h em todos os segmentos, o que demonstra que para condições de baixo fluxo de tráfego a velocidade média dos carros de passeio é considerada constante. Com esses resultados foi realizado um gráfico para relacionar o fluxo e o desvio padrão e determinar assim o ponto de transição (BP). Segundo Roess (2011) e Andrade (2012), o método de obtenção do valor do BP ocorre por meio de um ajuste de uma função sobre a relação fluxo-desvio padrão, sendo neste estudo a equação do polinômio do segundo grau a que determinou um melhor ajuste, através dos valores obtidos para o R^2 em cada segmento.

Desta maneira foram representados os gráficos de fluxo-desvio padrão e os polinômios obtidos para cada segmento, para determinar como ponto de transição BP o fluxo a partir da qual a derivada do polinômio se torna positiva, ativando o princípio do aumento no desvio padrão em torno de FFS , representado em uma linha vertical como maneira de exemplo nas Figura 6.10 e

Figura 6.11, aonde o ponto *BP* foi estimado para o segmento 2 em um fluxo de 405 cp/h/faixa e para o segmento 4 em um fluxo de 610 cp/h/faixa.

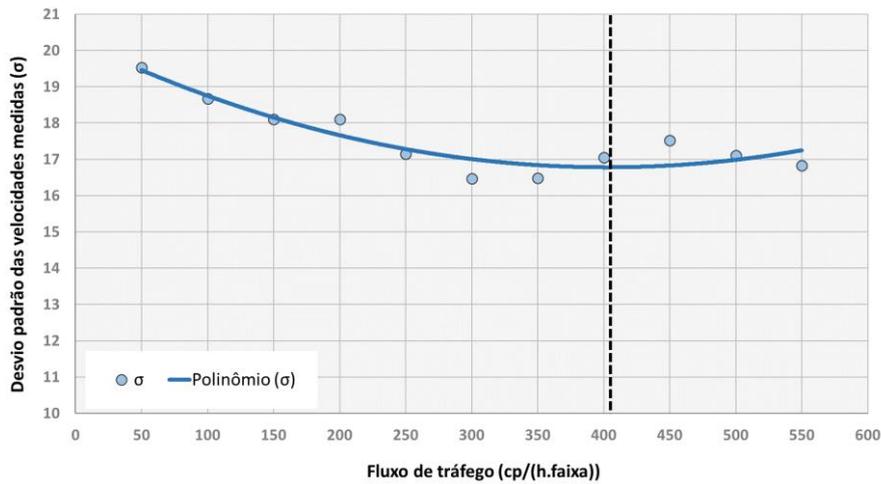


Figura 6.10 – Ponto de transição (*BP*) e desvio padrão das velocidades do segmento 2

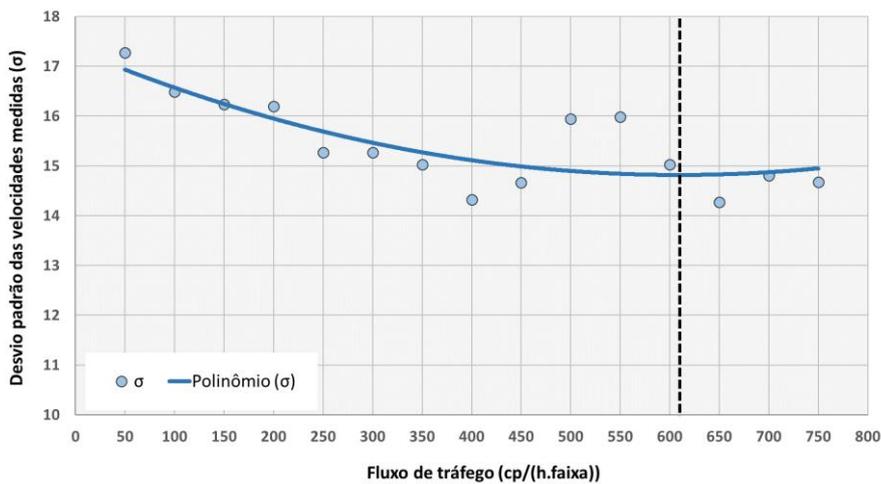


Figura 6.11 – Ponto de transição (*BP*) e desvio padrão das velocidades do segmento 4

Mediante este método verificou-se que os valores de fluxo de *BP* para segmentos rurais são maiores em comparação com os segmentos suburbanos. Segundo a Tabela 6.2 os segmentos rurais obtiveram valores de fluxo até de 610 cp/h/faixa e os segmentos suburbanos valores menores a esse com fluxos entorno de 405 e 485 cp/h/faixa.

Tabela 6.2 – Valores de ponto de transição (*BP*) nos locais estudados

SEGMENTO	RODOVIA	OCUPAÇÃO LINDEIRA	OBSERVAÇÕES	<i>FFS</i> (km/h)	<i>BP</i> (cp/(h.faixa))
1	BR-020	Suburbana	85273	88	440
2		Suburbana	84905	93	405
3		Rural	80413	106	567
4		Rural	80353	104	610
5	BR-040	Suburbana	84914	75	485
6		Suburbana	84884	93	440
7	BR-060	Rural	80398	113	535
8		Rural	80442	112	520
9		Rural	84872	76	473
10		Rural	84938	92	420
11	BR-070	Suburbana	105645	82	425
12		Suburbana	80395	70	460

Os valores encontrados de *BP*, foram significativamente inferiores aos estimados pelo HCM para este tipo de rodovias (*multilane highways*), em que se assume um valor de fluxo de 1.400 cp/h/faixa, demonstrando que o intervalo que a velocidade assume constate no modelo de fluxo-velocidade não se prolonga até esse valor para caso das rodovias em estudo.

6.2.2 Relação entre o ponto de transição e a velocidade de fluxo livre

Com os valores de fluxo dos pontos de transição, fez-se uma análise que relacionou a velocidade de fluxo livre com as características de cada segmento, que descreveu uma relação em que o ponto de transição não assumisse um valor constate e sim um valor que estivesse diretamente relacionado a *FFS*, como atualmente acontece para os segmentos rodoviários de autoestradas/expressas (*freeways*) segundo o HCM 6ª Edição.

Para encontrar essas relações, são plotados os dados de velocidade de fluxo livre no eixo *x* e os dados de *BP* no eixo *y*, e desta forma traçar uma linha de tendência com um coeficiente de correlação adequado que explique a relação entre as variáveis.

A Figura 6.12 apresenta a relação entre o ponto de transição e a velocidade de fluxo livre para os segmentos rurais, onde foi identificado uma tendência de diminuição dos valores de *BP* com o aumento da velocidade de fluxo livre, proporcionando um coeficiente de correlação linear de $R^2 = 0,86$.

A mesma relação se apresenta nos segmentos suburbanos (Figura 6.13) com uma linha de tendência de correlação um pouco inferior em relação aos segmentos rurais de $R^2 = 0,62$, mas confirmando que para ambas as classes de segmentos existe uma redução dos valores de BP com o aumento de FFS .

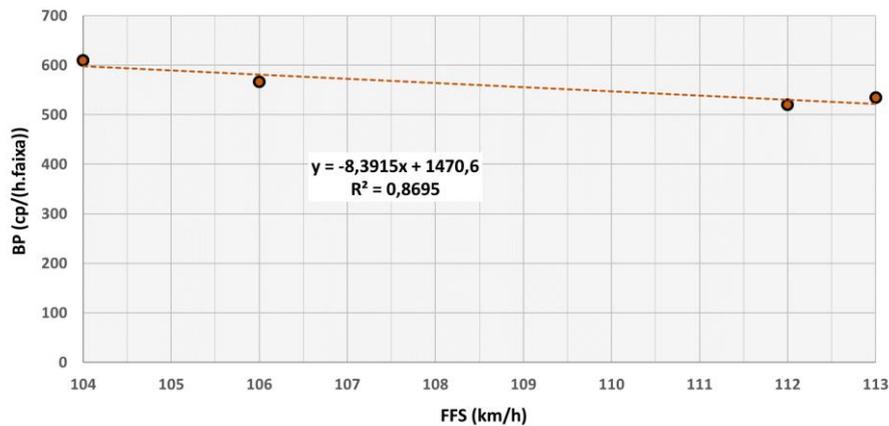


Figura 6.12 – Linha de tendência de BP com o aumento da velocidade de fluxo livre para segmentos rurais

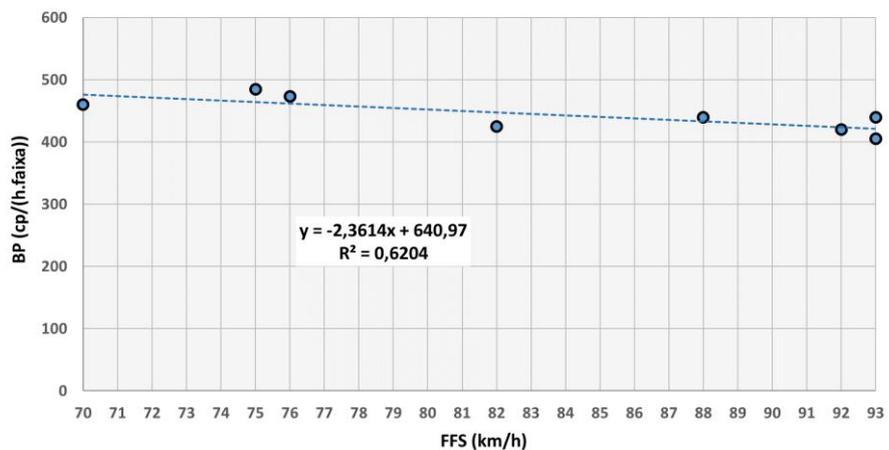


Figura 6.13 – Linha de tendência de BP com o aumento da velocidade de fluxo livre para segmentos suburbanos

Portanto, foram propostas para os segmentos rurais e suburbanos, as Equações (6.2) e a (6.3), obtidas do arredondamento dos coeficientes, para determinar os valores de BP em função da velocidade de fluxo livre e desta forma poder ajustar um conjunto coerente de curvas fluxo-velocidade para os dois grupos propostos que facilitem o uso do modelo calibrado.

$$BP = (-8) * FFS + 1470 ; \text{ para segmentos rurais} \quad (6.2)$$

$$BP = (-2) * FFS + 640 ; \text{ para segmentos suburbanos} \quad (6.3)$$

6.3 ESTIMATIVAS DO MODELO VISSIM PARA DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES DE TRÁFEGO NO INÍCIO DO CONGESTIONAMENTO

As curvas de fluxo-velocidade do HCM após o ponto de transição *BP*, determinam um modelo convexo de velocidades constante mantendo uma transição suave, correspondente ao intervalo de fluxo entre o ponto de transição *BP* e a capacidade *C*. Onde, segundo o HCM 6ª Edição os veículos podem razoavelmente esperar atravessar um ponto ou uma seção uniforme de uma faixa ou via durante um determinado período nas condições prevaletentes da rodovia.

No entanto, quando a demanda da rodovia excede a capacidade, ocorre uma transição e o sistema da via fica congestionada. Durante condição de tráfego congestionado, o fluxo de tráfego atinge a capacidade da via, o que pode ocasionar colapso do fluxo, formação de filas e aumento de tempo de viagem. Este efeito de transição de um estado não congestionado para um estado congestionado é definido como quebra do fluxo e pode ser analisado usando a relação fundamental entre fluxo de tráfego, densidade e velocidade.

Com a premissa de representar um valor máximo de veículos que possam ser transportados por uma rodovia foi empregado o uso do simulador Vissim para determinar o início dos períodos com congestionamento em cada segmento, onde os parâmetros de seguimento (*car-following*) e mudanças de faixas (*lane-change*) tem sua maior influência na modelagem.

Para modelar esses eventos no simulador, inicialmente optou-se em utilizar as contagens de tráfego dos equipamentos do PNCV, porém percebeu-se que o número de intervalos de tempo com congestionamento (acima de 4.000 veíc/hora) era limitado para alguns segmentos suburbanos e para a maioria dos segmentos rurais, que durante as 24 horas do dia só acontecia poucas horas de ocorrência de congestionamento. Do mesmo modo a execução da simulação com a demanda de tráfego mostrou que as rodovias tinham capacidade suficiente, não representando o efeito de engarrafamento e onda de choque devido a perturbação do tráfego.

Portanto, para representar o fluxo de cada segmento optou-se por aumentar artificialmente os volumes existentes nos *links* de forma progressiva para acionar o congestionamento. Para que o modelo consiga representar a taxa de fluxo máxima possível foi inserido no *link* um trecho de redução de velocidade (BETHONICO, 2016), localizada a 150 metros dos pontos finais de coleta de dados de cada segmento, fazendo com que os veículos diminuíssem a velocidade até 15 km/h e que a desaceleração dos veículos ao entrar no trecho de redução fosse mantida em 2 m/s.

Desta maneira a capacidade simulada é considerada como a taxa de fluxo medida na seção de destino (ponto final de cada segmento) em média durante o período de 15 minutos ou mais, onde o resultado é dividido pelo número de faixas e convertido em um taxa de fluxo por hora.

A Figura 6.14 apresenta que os resultados da simulação indicam que os ajustes geraram uma determinação razoável da capacidade e uma replicação, boa da variabilidade espacial e temporal dos dados.

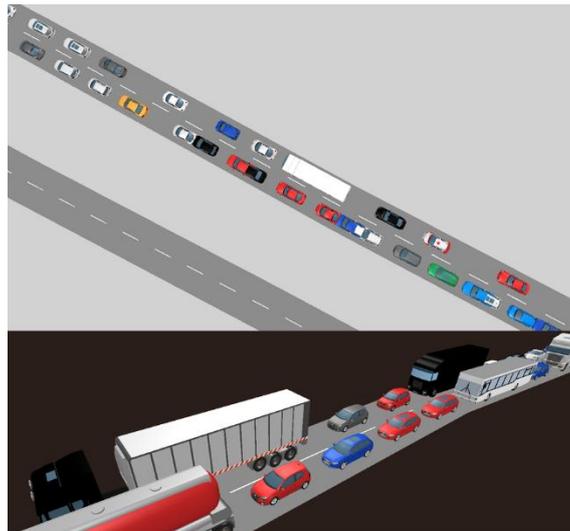


Figura 6.14 – Configuração de uma seção rodoviária congestionada

6.3.1 Regiões não congestionadas e determinação da densidade na capacidade

Com os resultados da modelagem de simulações em condições de altos volumes de tráfego, foi necessário determinar os limites entre as regiões não congestionadas e congestionadas, assim como também a determinação da densidade na capacidade (D_c), que reflete a velocidade média dos veículos nos fluxos máximos observados em condições não congestionadas.

Segundo o HCM 6ª Edição, durante as condições de tráfego congestionado, existe eventos de engarrafamento ou colapso das rodovias que provocam quedas repentinas na velocidade de pelo menos 25% abaixo da velocidade de fluxo livre, por um período sustentado de pelo menos 15 minutos que resulta em efeitos de formação de filas a montante do ponto do engarrafamento. A partir dessa premissa pode-se afirmar que a capacidade pode ser determinada com os resultados do modelo, como o fluxo máximo que pode ser atingido antes que ocorra o colapso da rede ainda estando em regime não congestionado.

Com a suposição de que a velocidade pode definir a transição de condições não congestionadas para as condições congestionadas, utilizou-se uma análise estatística para determinar esses dois conjuntos de grupos por meio da análise de *cluster* e o método não hierárquico de K-médias, que consiste em procurar agrupamentos homogêneos de itens representados por pontos num espaço n -dimensional em um número conveniente de grupos (*cluster*) relacionando-os através de coeficientes de similaridades ou de correspondências (BESSA JR. & SETTI, 2011).

Por meio dos resultados de fluxos-velocidade de cada segmento, realizou-se uma análise estatística utilizando dois *clusters* com uma medida de distância Euclidiana para determinar a similaridade entre os elementos a serem agrupados. De acordo com a distância Euclidiana (Equação (6.4)) a similaridade é atribuída em cada grupo quando existe uma convergência das distâncias dos elementos a um centroide mais próximo, processo que se repete até que todos os elementos estejam perfeitamente alocados em seus respectivos grupos.

$$d_{ij} = \left[\sum_{i=1}^N (s_i - s_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

Onde:

d_{ij} = distância entre cada observação i e cada centroide j ;

N = número total de observações;

S_i = valor de velocidade média; e

S_j = valor de velocidade do centroide de cada *cluster*.

Procurando classificar as observações em regimes não congestionado e congestionado, foram escolhidos dois pontos arbitrários que serviram como centroides iniciais, para que as observações de velocidade se agruparem, por similaridade, em torno desses centroides

formando agrupamentos. Cada elemento do conjunto inicial de dados foi comparado com cada centroide, por meio de uma medida de distância Euclidiana, sendo a menor distância ao centroide, o critério para um elemento ser alocado num determinado grupo. Após esta primeira verificação, a posição dos centroides foi recalculada exaustivamente até que todos os elementos estivessem perfeitamente alocados em seus respectivos grupos.

A Figura 6.15, apresenta um exemplo dos resultados de análise de *cluster* para o segmento 1, onde foram analisados fluxos de tráfego a partir de 1.750 cp/h/faixa, ponto a partir do qual se verifica melhor a transição entre regime não congestionado e congestionado. Cada *cluster* resultante está representado por uma cor, que serve para constatar o valor limite da velocidade entre os dois grupos.

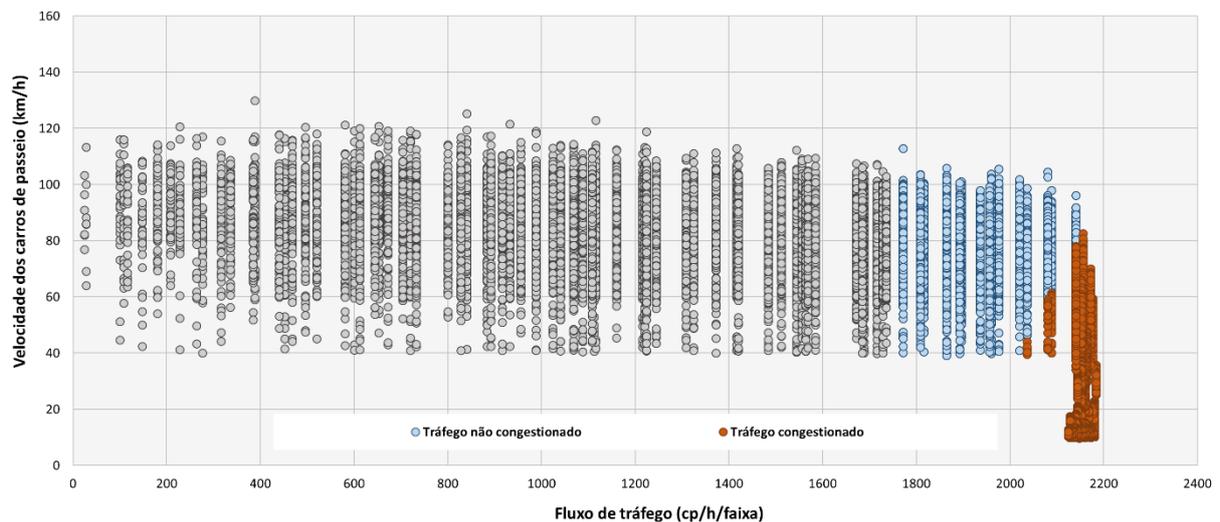


Figura 6.15 – Análise de *cluster* para regime não congestionado e congestionado segmento 1

Uma vez obtidas as velocidades de cada grupo, determinou-se a média das velocidades por intervalo de fluxo e desta maneira estimou-se o valor limite da velocidade para uma taxa de fluxo no regime não congestionado. A Tabela 6.3, mostra os resultados de velocidade e taxas de fluxo do segmento 1, apresentando que no regime não congestionado a velocidade limite é de 78 km/h com uma taxa de fluxo de 2.088 cp/h/faixa, o que significa que esta velocidade representa o menor valor entre as observadas em fluxo não congestionado e o maior valor entre as observações referentes ao agrupamento classificado como congestionado.

A partir dos dados de velocidade e sua correlação com as taxas de fluxo no regime não congestionado, optou-se por assumir que estas taxas de fluxo podem ser definidas como o valor da capacidade (C) de cada segmento, uma vez que estes valores são atingidos antes que ocorre o colapso da rede e o fluxo passe a se comportar em condições de congestionamento. Desta maneira, foram verificadas as velocidades associadas ao fluxo na capacidade, sendo a velocidade na capacidade (CS) definida como a média das velocidades dessas observações. A partir da capacidade e da velocidade na capacidade, foram estabelecidos os valores aproximados para a densidade na capacidade (D_c), por meio da relação fundamental do tráfego.

Tabela 6.3 – Análise de *cluster* para o segmento 1

FLUXO DE TRÁFEGO (cp/h/faixa)	CLUSTER DO REGIME NÃO CONGESTIONADO	CLUSTER DO REGIME CONGESTIONADO
1772	82	-
1808	80	-
1816	83	-
1864	79	-
1892	77	-
1896	80	-
1936	79	-
1956	74	-
1960	78	-
1976	79	-
2020	80	-
2036	78	41
2080	78	53
2088	78	55
2124	-	12
2128	-	13
2132	-	13
2136	-	12
2140	-	21
2144	-	14
2148	-	12
2152	-	18
2156	-	20
2160	-	17
2164	-	17
2168	-	13
2172	-	21
2176	-	28
2180	-	15
2184	-	32

O método descrito foi aplicado em 8 dos 12 segmentos listados na Tabela 6.4, onde foi possível verificar através do modelo de simulação que a capacidade fosse atingida, obtendo valores de

capacidade entre 2.016 e 2.150 cp/h/faixa e valores de velocidade na capacidade entre 69 e 98 km/h. Com os valores encontrados de C e CS e utilizando a relação fundamental do tráfego, foi possível estimar a densidade que varia entre 21 e 30 cp/km/faixa e assim adotar um valor médio de D_c de 23 cp/km/faixa para segmentos rurais e de 27 cp/km/faixa para segmentos suburbanos.

Tabela 6.4 – Capacidade, velocidade na capacidade e densidade na capacidade de cada segmento

SEGMENTO	RODOVIA	OCUPAÇÃO LINDEIRA	C (cp/(h.faixa))	CS (km/h)	Dc (cp/(km.faixa))
1	BR-020	Suburbana	2088	78	26
2		Suburbana	-		
3		Rural	2088	85	24
4		Rural	2016	90	22
5	BR-040	Suburbana	2116	70	30
6		Suburbana	2124	79	27
7	BR-060	Rural	2150	98	21
8		Rural	2100	93	22
9		Rural	2036	69	29
10		Rural	2108	87	24
11	BR-070	Suburbana	2016	75	27
12		Suburbana	-		

Os valores de densidade adotados para segmentos suburbanos, são próximos aos valores estimados pelo HCM para segmentos básicos de autoestrada e rodovia de múltiplas faixas que atingem sua capacidade a uma densidade de aproximadamente 28 cp/km/faixa (45 pc/mi/ln). Porém os valores de densidade adotados para segmentos rurais são mais parecidos aos encontrados por Andrade (2012) em rodovias de pista dupla em zonas rural, apresentando valores inferiores aos do HCM neste tipo de rodovias, as quais estão ligadas a prática de maiores velocidades na capacidade e a valores de capacidade levemente superior às zonas urbanas.

6.3.2 Limites do modelo convexo para relação fluxo-velocidade proposto

Com os valores estabelecidos de densidade na capacidade (D_c) e do ponto de transição (BP), para cada grupo de segmentos, são apresentados na Tabela 6.5 os valores dos limites que configuram parte da porção convexa da curva de fluxo-velocidade.

Tabela 6.5 – Limites das curvas fluxo-velocidade

OCUPAÇÃO LINDEIRA	Dc (cp/(km.faixa))	BP (cp/(h.faixa))
Rural	23	$(-8)*FFS + 1470$
Suburbano	27	$(-2)*FFS + 640$

A partir dos valores dos limites do modelo convexo encontrado para cada segmento, foi realizada uma análise matemática que ajustou o conjunto de curvas fluxo-velocidade encontrados para que fossem coerentes com os grupos de segmentos rurais (Figura 6.16) e segmento suburbanos (Figura 6.17).

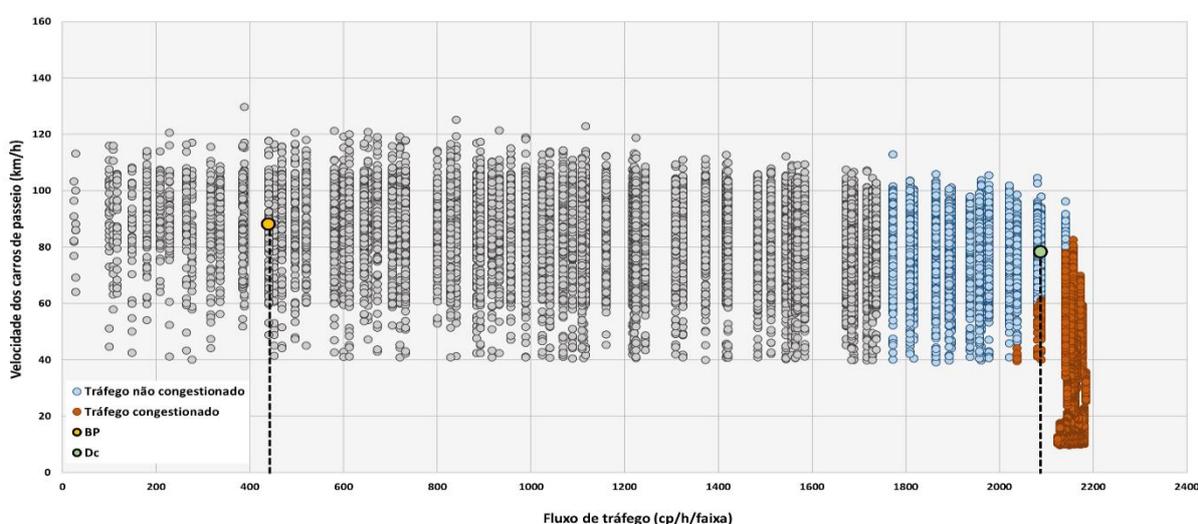


Figura 6.16 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 1

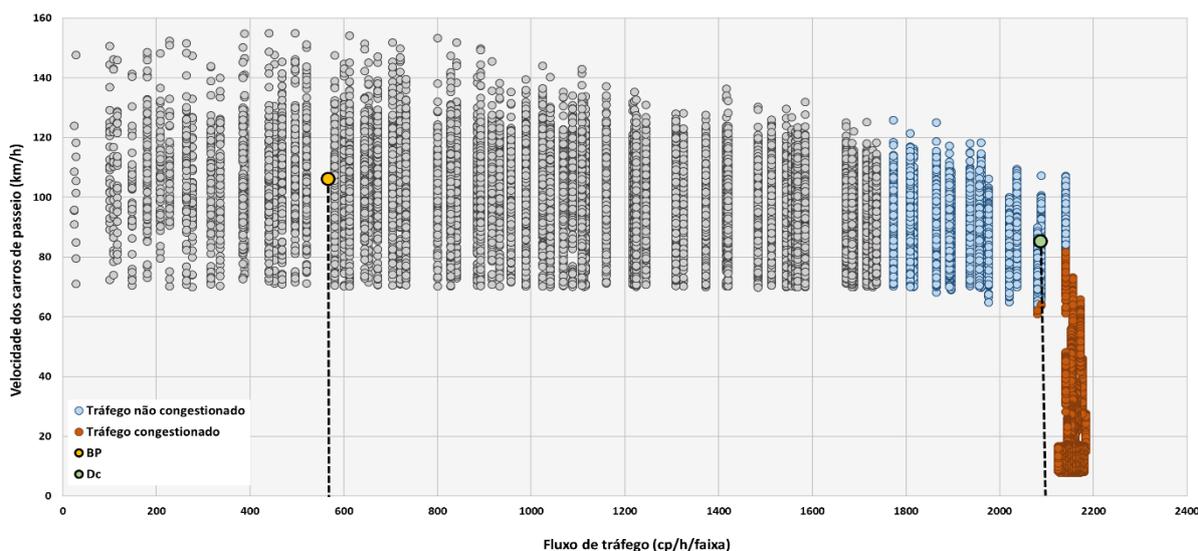


Figura 6.17 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 3

Além dos exemplos apresentados referentes aos segmentos 1 e 3, no Apêndice D estão apresentados os resultados obtidos para os demais segmentos estudados nesta pesquisa.

6.4 ADEQUAÇÃO DO MODELO DE FLUXO VELOCIDADE PARA RODOVIAS EM SEGMENTOS RURAIS E SUBURBANOS

As análises descritas anteriormente mostram que as equações fornecidas pelo HCM em função do fluxo (v_p) e da velocidade de fluxo livre (FFS), correspondem originalmente as formulações matemáticas das curvas ancoradas nos pontos notáveis da relação fluxo-velocidade, que consistem no ponto de transição BP e na densidade na capacidade D_c , ligada à capacidade C e a velocidade na capacidade CS por meio da relação fundamental do tráfego (ROESS, 2011). A fórmula geral dessa relação é ilustrada na Figura 6.18, onde o eixo x representa a taxa de fluxo de demanda ajustada de 15 minutos em carros de passeio (cp/h/faixa) e o eixo y representa a velocidade média espacial (S) do fluxo de tráfego (km/h).

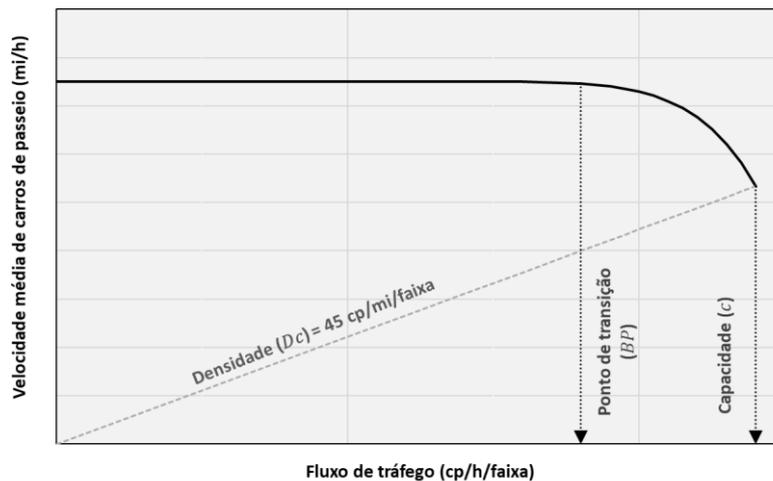


Figura 6.18 – Forma geral do HCM de representação de uma curva de fluxo-velocidade para autoestradas e rodovias de múltiplas faixas
Fonte: adaptado do TRB (2016).

As fórmulas analíticas onde as relações do HCM representam o modelo generalizado de fluxo-velocidade para as rodovias de pista dupla, podem ser descritas conforme a Equação (6.5).

$$S = FFS \quad v_p \leq BP$$

$$S = FFS - \frac{\left(FFS - \frac{c}{D_c}\right) (v_p - BP)^a}{(C - BP)^a} \quad BP \leq v_p \leq c \quad (6.5)$$

Onde:

S = velocidade média espacial ou de viagem (km/h);

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

v_p = taxa de fluxo de tráfego em carros de passeio (cp/h/faixa);

BP = ponto de transição;

C = capacidade;

D_c = densidade na capacidade;

a = parâmetro de expoente de calibração decimal.

Seguindo com a lógica das curvas do HCM, como mostra a Figura 6.18, determinou-se para o modelo proposto, estimar uma relação linear entre a velocidade de fluxo livre (FFS) com o capacidade (C) (Equação 6.6) visto que a densidade na capacidade é admitida constante (D_c), assim como, estabeleceu também, uma relação linear entre a velocidade de fluxo livre (FFS) com o ponto de transição (BP) da mesma forma como é estimado para autoestradas (Equação 6.7) desconsiderando um valor constante em todas as curvas (1.400 cp/h/faixa). Com relação ao parâmetro de calibração a , optou-se por estabelecer um valor entre 1,31 e 2 que satisfaça a concavidade das curvas propostas.

$$BP = x_{BP} * FFS + y_{BP} \quad (6.6)$$

$$C = x_c * FFS + y_c \quad (6.7)$$

Com as equações anteriores, criou-se um conjunto de curvas de fluxo-velocidade de formatos similares (ANDRADE, 2012), que obedecem os comportamentos notáveis dos pontos fixados da curva, determinando por meio de um algoritmo de otimização não linear, denominado Redução de gradiente generalizado (GRG), os valores das variáveis x_c , y_c e a que melhor se ajustem na Equação (6.5) para a determinação da velocidade média da corrente de tráfego.

De acordo com os resultados obtidos, o modelo proposto para segmentos rodoviários rurais envolve velocidades de fluxo livre entre 99 e 120 km/h, sendo que para um valor de fluxo de tráfego v_p a velocidade média de viagem pode ser estimado por meio da Equação (6.8) e a Figura 6.19, considerando a capacidade é dada pela Equação (6.9), que estipula valores menores ou iguais a 2.300 cp/h/faixa, e pela Equação (6.10).

$$S = FFS \quad v_p \leq BP$$

$$S = FFS - \frac{\left(FFS - \frac{C}{23} \right) (v_p - BP)^2}{(C - BP)^2} \quad BP < v_p \leq C \quad (6.8)$$

$$C = 14,28 * FFS + 586 \quad C \leq 2300$$

$$99 \leq FFS \leq 120 \quad (6.9)$$

$$BP = (-8) * FFS + 1470 \quad (6.10)$$

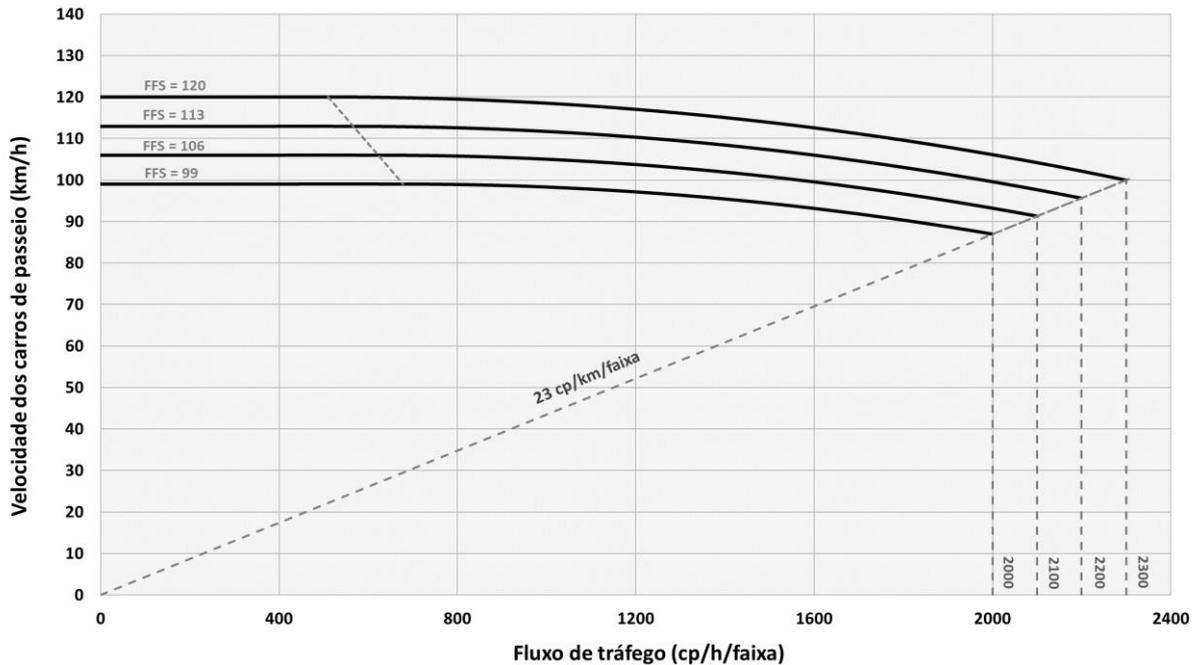


Figura 6.19 – Curva de fluxo-velocidade proposta para segmentos rodoviários rurais

Para outros segmentos rodoviários suburbanos, a análise obtida, estipula valores de velocidade de fluxo livre para o modelo proposto entre 75 e 96 km/h e a velocidade média de viagem da corrente de tráfego pode ser estimada para um determinado valor de v_p mediante a Equação (6.11) e a Figura 6.20, designando que para este tipo de rodovias a capacidade dada pela Equação (6.12) encontra-se entre 1.900 e 2.200 cp/h/faixa, e pela Equação (6.13).

$$S = FFS \quad v_p \leq BP$$

$$S = FFS - \frac{\left(FFS - \frac{C}{27} \right) (v_p - BP)^{1,31}}{(C - BP)^{1,31}} \quad BP < v_p \leq C \quad (6.11)$$

$$C = 14,28 * FFS + 829 \quad C \leq 2200$$

$$75 \leq FFS \leq 96 \quad (6.12)$$

$$BP = (-2) * FFS + 640 \quad (6.13)$$

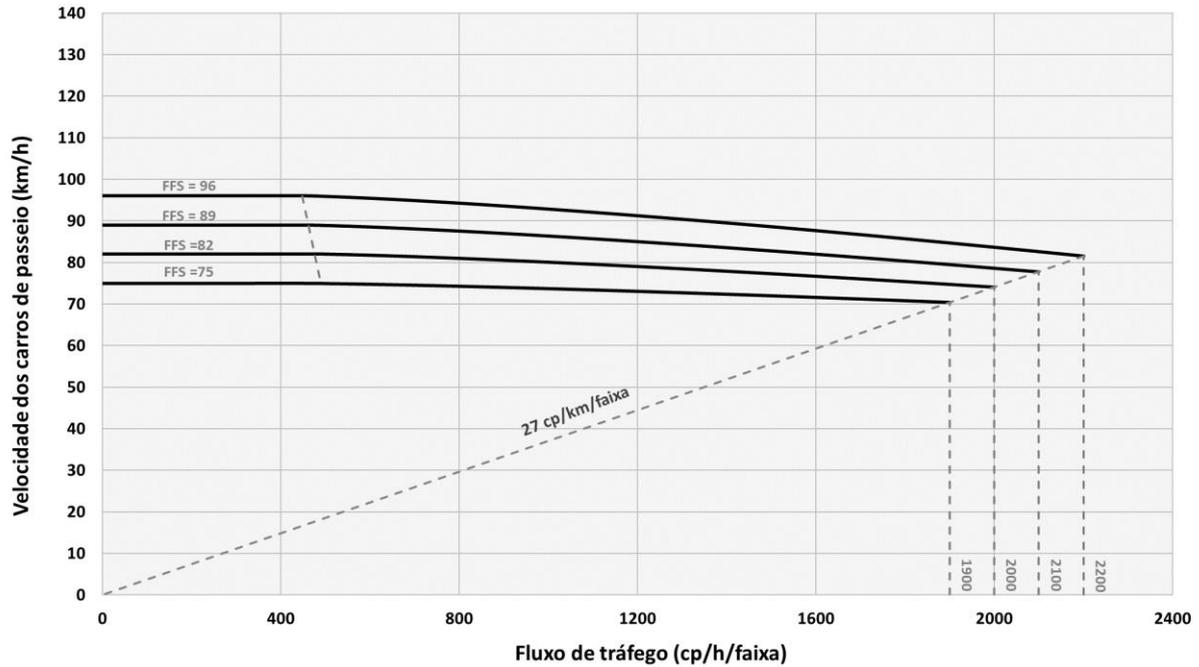


Figura 6.20 – Curva de fluxo-velocidade proposta para segmentos rodoviários suburbanos

Como pode-se observar nas Figura 6.19 e Figura 6.20, os modelos propostos são muito similares apresentando as suas principais diferenças no ponto de transição (BP) e nos valores da densidade na capacidade (D_C). Com relação ao ponto de transição pode-se afirmar que nos segmentos suburbanos a diminuição da velocidade acontece com mais antecipação do que nas velocidades observadas nos segmentos rurais. Do mesmo modo que as velocidades na capacidade (CS) para os segmentos suburbanos são inferiores aos valores estimados para as rodovias de segmentos rurais, já que os valores da densidade na capacidade são diferentes entre os grupos.

O modelo proposto para segmentos rurais, possui um aspecto semelhante ao modelo convexo da curva de fluxo-velocidade de autoestradas estimado pelo HCM uma vez que o valor do parâmetro de calibração a é o mesmo. Porém, como é apresentado na Figura 6.21 a principal diferença encontrada com o modelo usado no HCM 6ª Edição é o valor de BP que é superestimado em relação aos valores menores encontrados para as rodovias deste estudo, assim como as velocidades na capacidade estimadas pelo modelo proposto são mais elevadas que as encontradas usando o modelo do manual.

Igualmente essas mesmas diferenças acontecem para os segmentos suburbanos em relação com o HCM, onde o parâmetro de calibração a é o mesmo das curvas de fluxo-velocidade para rodovias de múltiplas faixas, apresentando uma característica notável nos valores do ponto BP muito inferiores com taxas de fluxo a partir de 448 cp/h/faixa, só que com valores de velocidades na capacidade ligeiramente mais elevados que as encontradas pelo manual (Figura 6.22).

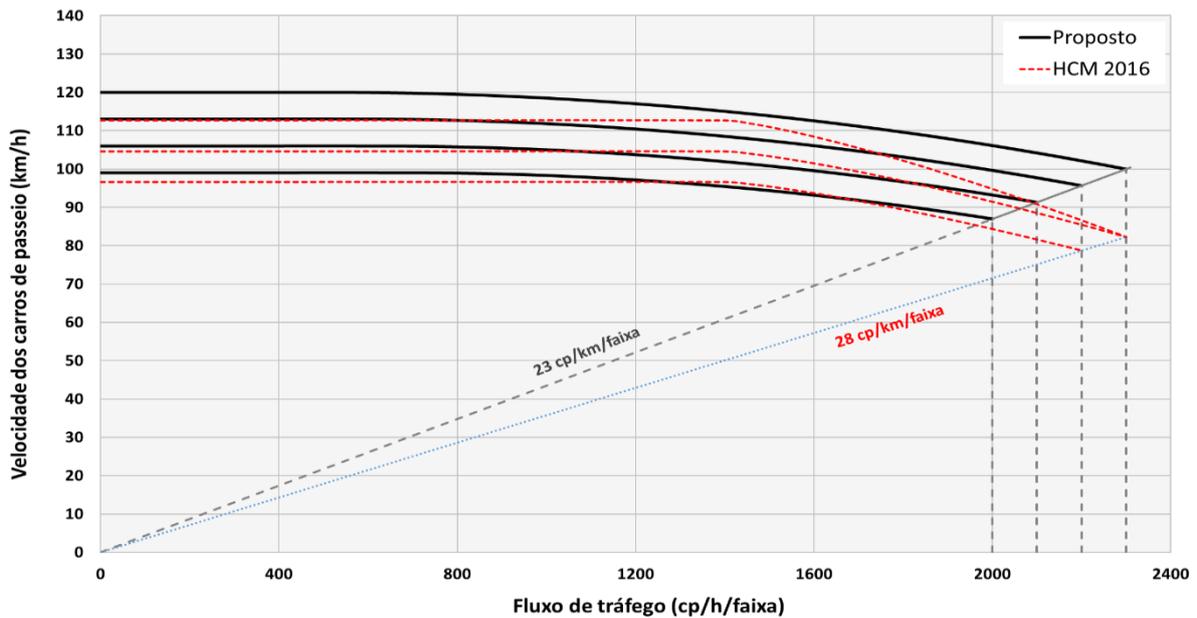


Figura 6.21 – Comparação entre o modelo proposto para segmentos rurais e o modelo do HCM 6ª Edição para múltiplas faixas

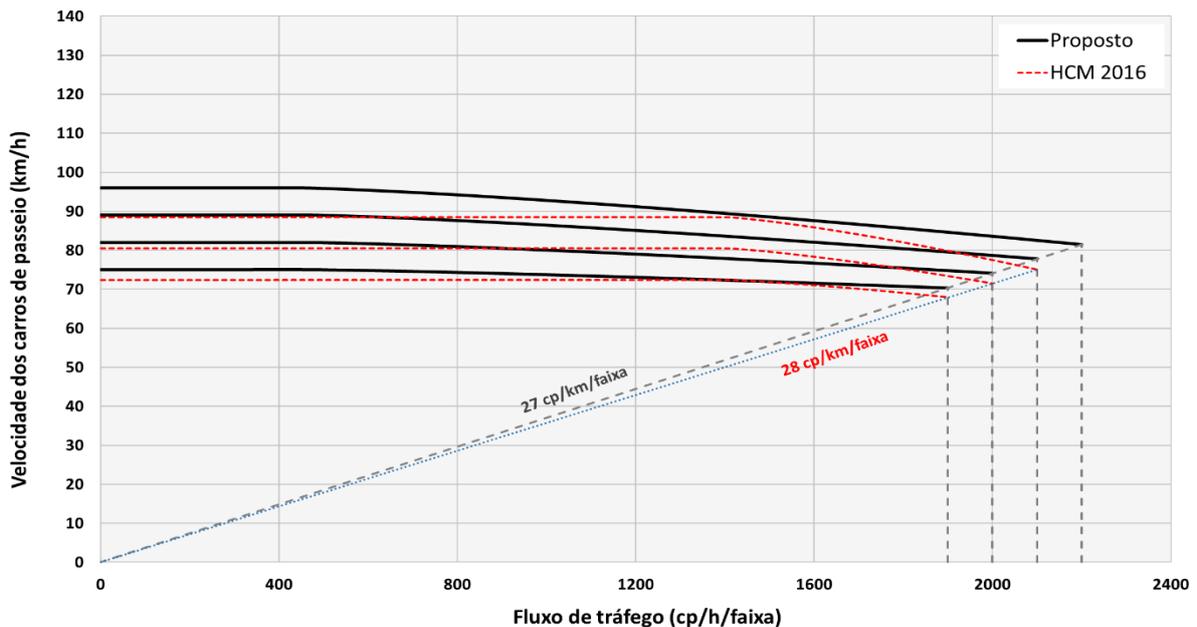


Figura 6.22 – Comparação entre o modelo proposto para segmentos suburbanos e o modelo do HCM 6ª Edição para múltiplas faixas

6.4.1 Relação fluxo-velocidade de rodovias brasileiras

Uma vez obtido o conjunto de curva de fluxo-velocidade para rodovias de pista dupla em segmentos rurais e segmentos suburbanos, foram comparados os resultados deste estudo com trabalhos similares realizados no Brasil neste tipo de rodovias, assim como também com os modelos do Manual americano HCM em suas duas últimas edições.

Em relação as velocidades de fluxo livre (*FFS*), da (Tabela 6.6), o modelo proposto conseguiu estimar velocidades muito próximas ao do HCM 6ª Edição, ressaltando que nesta última versão são acrescentadas novas curvas de fluxo-velocidade designadas com velocidades superiores a 105 km/h. Contudo, no modelo proposto a curva de fluxo-velocidades para *FFS* de 120 km/h não foi levantada em campo, foi determinada por meio de extrapolação, seguindo as premissas encontradas por Andrade (2012) onde foram identificados trechos com velocidades de fluxo livre próximos a esse valor. Importante ressaltar que as velocidades maiores a 120 km/h são associadas a rodovias de autoestradas segundo o manual americano.

Tabela 6.6 – Comparação de velocidades de fluxo livre (*FFS*)

<i>FFS</i> (km/h)						
OCUPAÇÃO LINDEIRA	ESTIMADO	ANDRADE (2012)	TIPO	HCM 2010	TIPO	HCM 6th Edição
Rural	120	120	Autoestrada	121	Auto.	121
	113	110		113		113
	106	100		105		105
	99	90		97		-
Suburbano	96	110	Pista dupla	96	Pista dupla	96
	89	100		88		88
	82	90		81		81
	75	80		72		72

Com relação aos valores do ponto de transição (*BP*) (Tabela 6.7), os valores obtidos neste estudo e no de Andrade (2012) no Brasil, são inferiores aos valores estipulados pelo manual para este tipo de rodovias de pista dupla. Sendo que no modelo proposto, os valores obtidos ainda são menores aos encontrados por Andrade (2012) em rodovias do estado de São Paulo, uma vez que este autor assemelha o comportamento de vias rurais aos comportamentos apresentados pelo HCM 2010 para autoestradas e as vias urbanas a aspectos semelhantes de rodovias de múltiplas faixas.

Tabela 6.7 – Comparação de pontos de transição (BP)

PONTO DE TRANSIÇÃO BP (cp/h/faixa)					
OCUPAÇÃO LINDEIRA	ESTIMADO	ANDRADE (2012)	TIPO	HCM 2010	HCM 6th Edição
Rural	510	600	Pista dupla	-	-
	566	700		1400	1400
	622	800			
	678	900			
Suburbano	449	450			
	462	500			
	476	550			
	490	600			

Tabela 6.8 – Comparação de velocidades na capacidade (CS)

Velocidades na capacidade CS (km/h)						
OCUPAÇÃO LINDEIRA	ESTIMADO	ANDRADE (2012)	TIPO	HCM 2010	TIPO	HCM 6th Edição
Rural	100	94	Autoestrada	86	Auto.	89
	96	91		86	Pista dupla	82
	91	87		84		82
	87	83		82		-
Suburbano	81	90	Pista dupla	88		Pista dupla
	78	84		82	75	
	74	78		75	72	
	70	72		68	68	

Tabela 6.9 – Comparação de capacidade (C)

CAPACIDADE C (cp/h/faixa)						
OCUPAÇÃO LINDEIRA	ESTIMADO	ANDRADE (2012)	TIPO	HCM 2010	TIPO	HCM 6th Edição
Rural	2300	2550	Autoestrada	2400	Auto.	2400
	2200	2450		2400	Pista dupla	2300
	2100	2350		2350		2300
	2000	2250		2300		-
Suburbano	2200	2300	Pista dupla	2200		Pista dupla
	2100	2150		2100	2100	
	2000	2000		2000	2000	
	1900	1850		1900	1900	

Por fim, em relação aos valores da velocidade na capacidade (CS) e da capacidade (C), Tabela 6.8 e Tabela 6.9, os valores de CS encontrados são superiores aos estimados pelo HCM em suas duas últimas versões e aos determinados por Andrade (2012) para vias urbanas e muito

próximos dos valores de vias rurais. Ao contrário, os valores de C propostos são muito parecidos aos do HCM 6ª Edição e diferentes aos estimados por Andrade (2012) e o HCM 2010, uma vez que estes últimos possuem similaridades nos seus valores.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, foram tratados e analisados os dados de tráfego do DNIT, obtidos através dos equipamentos de controle de velocidade, identificando e eliminando dados inadequados para o estudo do modelo de fluxo-velocidade proposto.

A utilização dos dados dos equipamentos de controle de velocidade, fornecem uma grande quantidade de informação de monitoramento contínuo da maioria de rodovias federais do Brasil, convertendo-se numa fonte importante de dados de tráfego.

Os métodos utilizados para a determinação de fluxos de tráfego através do modelo Vissim, foram considerados satisfatórios para representar o comportamento do tráfego de segmentos de rodovias de pista dupla em áreas rurais e suburbanas e ao mesmo tempo para o desenvolvimento de curvas de fluxo-velocidade, permitindo com a implementação de métodos matemáticos, determinar os limites da porção da curva do modelo fluxo-velocidade, correspondente aos valores do ponto de transição (BP), velocidade na capacidade (CS) e densidade (D_C), estimados para cada um dos 12 segmentos estudados.

Através da relação fundamental do tráfego foram designados os valores da capacidade em cada um dos segmentos e assim foi possível obter uma calibração da porção convexa da curva do modelo fluxo-velocidade. Como resultado, foram obtidas curvas do modelo fluxo-velocidade para segmentos rodoviários de pista dupla em áreas rurais e suburbanas, fornecendo suas equações e mostrando suas diferenças em comparação com os modelos estimados pelo HCM.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES GERAIS

Este estudo teve como objetivo fazer uma adaptação da metodologia do HCM que pudesse ser utilizada com confiabilidade nas rodovias de múltiplas faixas no Brasil. Desta maneira, foram utilizados 12 segmentos rodoviários de vias existentes na cidade de Brasília e sua região metropolitana, com características de pista dupla, para os quais foram realizadas pesquisas de velocidade e contagem de tráfego. Foram definidos 48 postos de pesquisa que, durante 9 dias, permitiu obter 16 horas e 14 minutos de filmagem, com um total de 66.115 veículos coletados, 216 registros de velocidades de viagem e 36.768 registros de placas.

Com os dados coletadas em campo, foi possível confirmar que as características do fluxo de tráfego observado nas rodovias de pista dupla em áreas rurais e suburbanas no Distrito Federal, são diferentes das estimadas pelo HCM 6ª Edição. Esse achado comprova a necessidade de adaptação do manual americano para as condições da realidade brasileira.

Empregando a base de dados obtida, foi construído o modelo de simulação microscópica de tráfego no *software* Vissim de modo a viabilizar a verificação da hipótese desta pesquisa. Um dos objetivos da tese foi propor uma metodologia para calibração e validação do simulador microscópico, por meio deste trabalho foi possível demonstrar que a metodologia proposta é satisfatória através da calibração dos 12 segmentos rodoviários do Distrito Federal e de seu entorno, conseguindo representar o comportamento de viagem em conformidade com o observado em campo.

O método de calibração utilizando algoritmos genéticos (AG) mostrou-se bastante eficiente para este tipo de rodovias no simulador Vissim. Vale salientar que a metodologia de calibração aplicada para o presente estudo, bem como os valores encontrados para os parâmetros do simulador Vissim podem ser utilizados em outras redes rodoviárias brasileiras, desde que apresentem características semelhantes às da rede viária aqui simuladas.

Com relação ao *software* Vissim é possível afirmar que os fatores mais importantes para o bom desempenho de seu modelo de simulação são os parâmetros de seguimento (*car-following*),

parâmetros de mudança de faixa (*lane-change*) e principalmente, as distribuições de velocidade desejadas dos veículos. Foi possível atestar também, que nos cenários com altos volumes de tráfego, os parâmetros de calibração possuem influência significativa na modelagem, principalmente na capacidade e na representação das mudanças de faixa.

Além das informações coletadas em campo, foi possível obter dados de equipamentos de controle de velocidade proporcionados pelo DNIT, que forneceram uma grande quantidade de informação de monitoramento contínuo da maioria de rodovias federais do Brasil, o que os converte em uma fonte importante de dados de tráfego para o país.

Com o modelo do Vissim calibrado para simular as condições de pistas duplicadas e os dados de tráfego do DNIT, foram implementadas metodologias para a representação de taxas de fluxo máximas, que se mostraram adequadas para obtenção de dados próximos à capacidade das rodovias, convertendo-se como uma alternativa para o auxílio de falta de informação que é bastante comum neste tipo de pesquisa.

Os métodos propostos de caracterização das rodovias duplicadas estabelecidos em dois grandes grupos, denominadas como segmentos rurais e segmentos suburbanos, se mostraram muito próximos ao tráfego que atualmente transita neste tipo de rodovias, uma vez que este tipo de diferenciação operacional de rodovias duplicadas não é levado em consideração pelo HCM. Para estes dois grupos de rodovias de pista dupla, foram determinados os limites da porção da curva do modelo fluxo-velocidade, correspondente aos valores do ponto de transição (*BP*), velocidade na capacidade (*CS*) e densidade (D_c), uma vez foram estimadas as velocidades de fluxo livre (*FFS*) para cada um dos 12 segmentos pesquisados.

Com relação ao ponto de transição (*BP*), para os segmentos rurais e suburbanos, assim como ocorre no modelo do HCM para autoestradas, foi identificada uma relação linear de diminuição dos valores do (*BP*) com o aumento da velocidade de fluxo livre (*FFS*), sendo encontrados nos dois casos valores inferiores aos apresentados pelo manual.

Para os segmentos rurais e suburbanos verificou-se inicialmente que os valores da capacidade são próximos aos apresentados pelo HCM 6ª Edição. No entanto, os valores da velocidade na capacidade (*CS*) do modelo proposto resultaram superiores aos do referido manual.

Com a caracterização do comportamento do tráfego para as rodovias de pista dupla investigadas, foi possível estabelecer condições limites mediante o ajuste de um modelo de curvas de fluxo-velocidade produzidas para segmentos rurais e suburbanos. Como resultado, foi possível obter um conjunto de curvas de aparência coerentes que não necessitaram de ajuste visual e que possuem equações matemáticas que descrevem seu procedimento de obtenção e sua correlação com os segmentos estudados.

Por fim, conclui-se que o modelo proposto de curvas de fluxo-velocidade mostra-se adequado para descrever a qualidade do serviço em rodovias de pista dupla em Brasília e seu entorno metropolitano. O método empregado para obtenção das curvas fluxo-velocidade pode ser replicado possibilitando que este tipo de caracterização operacional seja viabilizado para outras rodovias no Brasil.

7.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O estudo realizado apresentou limitações, principalmente, quanto a pesquisa de campo. Fatores externos inviabilizaram realizar a coleta dados por um período maior, o que resultou em uma quantidade de dados representativos relativamente pequena para cada segmento.

Outra limitação foi dada pela impossibilidade de obter dados velocidade média de viagem em rodovias de outras regiões do país, o que fez com que o modelo testado tenha ficado restrito à região do distrito federal e seu entorno, em Goiás.

Por fim, as próprias condições de operação das rodovias investigadas que não atingiram volumes de saturação na ocasião da coleta de dados, demandou pela necessidade do uso do simulador para a geração de dados sintéticos de modo a viabilizar a geração completa das curvas de fluxo-velocidade.

7.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que em pesquisas futuras sejam coletados dados adicionais para a simulação de períodos mais longos e maior abrangência de área de teste, ilustrando a importância de utilizar uma maior quantidade de dados de velocidade, que representem uma boa cobertura espacial da

rede. Recomenda ainda, adotar outras medidas de desempenho além do tempo de viagem e número de veículos.

Este trabalho limitou-se a estimar novas curvas de fluxo-velocidade para rodovias de pista dupla que pudessem ser obtidos com o uso de simuladores de tráfego, sendo assim, não foram investigados os efeitos de fatores como, número de faixas, presença e dimensão dos acostamentos, densidade de pontos de acesso e porcentagem de caminhões nos valores estimados de capacidade. Dessa forma, recomenda-se o uso de simuladores para o estudo de fatores de ajuste que sejam adaptados para as condições de tráfego brasileiras.

Com relação à calibração do modelo de simulação, foi possível observar que os parâmetros calibrados do Vissim foram capazes de reproduzir o tráfego observado de forma adequada, porém, outros parâmetros podem ser incluídos em estudos futuros, com o objetivo de buscar a melhoria nos resultados.

Os parâmetros do Vissim foram calibrados para condições de fluxo livre, uma vez que condições de tráfego congestionado não foram encontradas nas rodovias de pista dupla no entorno de Brasília. Sendo assim, sugere-se que o modelo Vissim seja calibrado para fluxos de tráfego elevados, de forma que ambas as situações (fluxo livre e congestionado) possam ser contempladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBADIPUDI, R., DOROTHY, P. & KILL, R. (2006) *Development and Validation of Large-Scale Microscopic Models*. Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., Estados Unidos. CD-ROM
- ANDRADE, G. R. (2012) *Capacidade e relação fluxo-velocidade em autoestradas e rodovias de pista dupla paulistas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ARIOTTI, P., ARAÚJO, D. R. C., MOSCARELLI, F. C. & CYBIS, H. B. B. (2004) *Associação de modelos macroscópicos e microscópicos de tráfego para estudo de circulação*. Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Florianópolis, Santa Catarina, p. 478 – 489.
- AYALA, R. J. L. (2013) *Procedimento para Identificação dos Principais Parâmetros dos Microsimuladores a serem Considerados no Processo de Calibração*. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação: T. DM – 004 A/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- BARCELÓ, J. (2011) *Fundamentals of Traffic Simulation*. The International Series in Operations. *Research & Management Science book series*, ISOR, v. 145, Springer.
- BESSA JR., J. E. (2009) *Caracterização do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples do estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BESSA JR., J. E. & SETTI, J. R. (2011) *Derivation of ATS and PTSF Functions for Two-lane, Rural Highways in Brazil*. 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Procedia Social and Behavioral Sciences, Elsevier, Amsterdam, 16, p. 282–292. v.
- BESSA JR., J. E. & SETTI, J. R. (2012) *Relações fluxo-velocidade para rodovias de pista simples no Brasil*. Anais do XXVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Joinville, Santa Catarina.
- BESSA JR., J. E. (2015) *Avaliação de medidas de desempenho para rodovias de pista simples no Brasil*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BETHONICO, F. C. (2016) *Calibração de simuladores microscópicos de tráfego através de medidas macroscópicas*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 116 p.
- BHAM, G. H. & VALLATI, M. (2011) *Slip ramp spacing design for truck only lanes using microscopic simulation*. Proceedings of the First Transportation and Development Institute Congress, ASCE, Chicago, Illinois, Estados Unidos. p. 13 – 16.

- BLOOMBERG, L. & DALE, E. J. (2000) *Comparison of VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models on a Congested Network*. Transportation Research Record 1727, TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 52-60.
- BRILON, W., GEISTEFELDT, J. & REGLER, M. (2005) *Reliability of Freeway Traffic Flow. A Stochastic Concept of Capacity*. Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, College Park, Maryland, p. 125-144.
- CALEFFI, F., MOISAN, Y., CYBIS, H. B. B. & MICHEL, F. D. (2012) *Simulação de alternativas operacionais de um segmento especial de autoestrada através do software VISSIM*. Anais do XXVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Joinville, Santa Catarina.
- CARVALHO, L. G. S. (2018) *Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 121 p.
- CHEU, R-L., JIN, X., NG, K-C., NG, Y-L. & SRINIVASAN, D. (1998) Calibration of FRESIM for Singapore Expressway using genetic algorithm. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 124(6), nov-dec. Singapore.
- CHITTURI, M. V. & BENEKOHAL, R. F. (2008) Calibration of VISSIM for the freeway. *Proceeding of 87th TRB Annual Meeting*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos.
- CHU, L., LIU, H. X., OH, J-S. & RECKER, W. (2003) *A calibration procedure for microscopic traffic simulation. Intelligent Transportation Systems*. Proceedings, v. 2, p. 1574 – 1579, IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ITSC.2003.1252749>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- CNT (2015) Confederação Nacional do Transporte. *Pesquisa Rodoviária CNT – 2015*. Relatório gerencial, Brasil, CNT, SEST, SENAT.
- CONSTANTINOS, A., BARCELO, J., BRACKSTONE, M., CELIKOGLU, H. B., CIUFFO, B., PUNZO, V., SYKES, P., TOLEDO, T., VORTISCH, P. & WAGNER, P. (2014) Traffic Simulation: Case for Guidelines, COST Action TU0903. *Scientific and Technical Research series*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union. 100 p. Disponível em: <http://10.2788/11382>.
- CUNHA, A. L. & SETTI, J. R. (2006) *Calibração do modelo de desempenho de caminhões do CORSIM através de um algoritmo genético*. Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília, Distrito Federal. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2006, v. 01, Rio de Janeiro, p. 88-99.
- CUNHA, A. L. B.N. (2007) *Avaliação do Impacto da Medida de Desempenho no Equivalente Veicular de Caminhões*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- CUNHA, A. L. B. N., MODOTTI, M. M. & SETTI, J. R. (2008) *Classificação de caminhões através de agrupamento por análise de cluster*. Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, p. 1447–1459.
- CUNHA, A. L. B. N. & SETTI, J. R. (2009) *Calibração do Modelo de Desempenho de Caminhões do CORSIM através de um Algoritmo Genético*. Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília, Distrito Federal. CD-ROM.
- CUNTO, F. & SACCOMANNO, F. F. (2008) Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections, *Accident Anal. Prev.*, 40(3), p.1171–1179.
- DEMARCHI, S. H. (2000) *Influência de Veículos Pesados na Capacidade e Nível de Serviço de Rodovias de Pista Dupla*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DEMARCHI, S. H. & SETTI, J. R. (2000) *Calibração da curva fluxo-velocidade-densidade para rodovias de pista dupla brasileiras*. Anais do XI Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transportes, Gramado, Rio Grande do Sul. Engenharia de Tráfego e Transportes 2000: Avanços para uma era de mudanças. Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. p. 131-144.
- DNER (1999) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Manual de projeto geométrico de rodovias rurais*. Rio de Janeiro: Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica, Publicação IPR-706. 195 p.
- DNIT (2006) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de projeto e práticas operacionais para segurança nas rodovias*. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação IPR. p. 723-384.
- DNIT (2010) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Diretoria Executiva, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação IPR. p. 741. 280.
- DUEÑAS-RUIZ, D. E. & DÍAZ-MARQUEZ, S. E. (1998) *Propuesta metodológica para el cálculo de La capacidad e niveles de servicio en carreteras colombianas de dos carriles*. Anais do X Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Actas del X Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Santander, Espanha, p. 597-604.
- EGAMI, C. Y. (2006) *Adaptação do HCM-2000 para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 240 p.
- ELEFTERIADOU, L., ARGUEA, A., KONDYLI, A. & HEASLIP, K. (2007) *Impact of Trucks on Arterial LOS and Freeway Work Zones Capacity (Part B)*. Gainesville, Transportation Research Center, University of Florida, Estados Unidos.
- FELLENDORF, M. & VORTISCH, P. (2010) *Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM*. Fundamentals of Traffic Simulation, International Series in Operations Research &

Management Science 145. Disponível em: http://10.1007/978-1-4419-6142-6_2, Springer. Acesso em: 15 jan. 2020.

- FEMKE, V. W. K., SERGE, P. H., KEES, V. E. & HANS, V. L. (2014) *Traffic Flow Modeling: Genology*. Transportation Research Circular E-C195, Washington, D. C., Estados Unidos, p. 01–16.
- FHA (2003) Federal Highways Administration. *Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models*. Publication Number: FHWA-RD-03-050, Estados Unidos. 118 p.
- FHWA (2013) *Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures*, Edition. Federal Highway Administration, Washington, D.C., Estados Unidos.
- GALARRAGA, J., HERZ, M., ALBRIEU, L., & DEPIANTE, V. (2001) *El Manual de Capacidad 2000 y la estimación de capacidad y nivel de servicio en intersecciones semaforizadas para condiciones argentinas*. Anais do XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, C1-180, Buenos Aires, Argentina.
- GAO, Y. (2008) *Calibration and comparison of the VISSIM and INTEGRATION microscopic traffic simulation models*. Thesis (Master degree), Virginia Tech, Blacksburg, VA, Estados Unidos.
- GASPARINI, R. (2002) *Análise da Adequabilidade do HCM para o Estudo de Vias Urbanas*. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM-05 A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 94 p.
- GOLDBERG, D. E. (1989) *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishment Company, Inc., Reading, Massachussets, Estados Unidos.
- GOMES, G., MAY, A. & HOROWITZ, R. (2004) *Congested freeway microsimulation model using VISSIM*. CITESEER. Transportation Research Record. Pasadena, California, Estados Unidos.
- JAYAKRISHNAN, R., CORTÉS, C. E., LAVANYA, R. & PAGÉS, L. (2002) *Simulation of Urban Transportation Networks with Multiple Vehicle Classes and Services: Classifications, Functional Requirements and General-Purpose Modeling Schemes*. Technical Report UCI-ITS-WP-02-16, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, Estados Unidos.
- JEANNOTTE, K., CHANDRA, A., ALEXIADIS, V. & SKABARDONIS, A. (2004) *Traffic Analysis Toolbox Volume II: Decision Support Methodology for Selecting Traffic Analysis Tools*. Report FHWA-HRT-04-038, Federal Highway Administration, Washington, D.C., Estados Unidos.
- KARIMI, M. & ALECSANDRU, C. (2019) Two-fold calibration approach for microscopic traffic simulation models. *Intelligent Transport Systems*, 13(10), p.1507-1517, Disponível em: <http://10.1049/iet-its.5369>. Acesso em: 15 jan. 2020.

- KIM, S-J.; KIM, W. & RILETT, L. R. (2005) *Calibration of microsimulation models using nonparametric statistical techniques*. Transportation Research Record 1935, TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 111-119.
- LASTRAN (2013) Laboratório de Sistemas de Transportes. *Projeto: Concepção de Sistema de Gerenciamento Ativo de Tráfego*. Relatório final, CONCEPA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 272 p.
- LEE E-B., & KIM, C. (2004) *Validation of a microscopic traffic simulation study on urban freeway reconstruction project with high-traffic volume*. Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Southern California, Estados Unidos.
- LEUTZBACH, W. (1988) *Introduction to the theory of traffic flow*. Berlin: Springer-Verlag. 204 p.
- LI, C., KARIMI, M., & ALECSANDRU, C. (2017) Vehicular Safety and Operations Assessment of Reserved Lanes using Microscopic Simulation, *Transportation Research Board Annual Meeting*, Concordia University, Montreal, Canadá.
- LI, C., KARIMI, M., & ALECSANDRU, C. (2018) Microscopic simulation-based high occupancy vehicle lane safety and operation assessment: A case study, *J. Adv. Transp.*, v. 2018, p. 01–12. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/5262514>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- LIU, H. X., CHU, L. & RECKER, W. (2001) *PARAMICS API Development Document for Actuated Signal, Signal Coordination and Ramp Control*. Working Paper UCI-ITS-TS-WP-01-03, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, Estados Unidos.
- LOUREIRO, C. F. G., PAULA, F. S. M., SOUZA, D. D. de M. R. & MAIA, F. V. B. (2004) *Avaliação da Qualidade do Tráfego nas Vias Arteriais de Fortaleza utilizando o Highway Capacity Manual 2000*. Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Florianópolis, Santa Catarina.
- LOWNES, N. E. & MACHEMEHL, R. B. (2006) Sensitivity of Simulated Capacity to VISSIM Driver Behavior Parameter. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1988, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 102–110.
- MA, T. & ABDULHAI, B. (2002) *Genetic Algorithm-based Optimization Approach and generic tool for calibration traffic microscopic simulation parameters*. Transportation Research Record 1800, TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 06-15.
- MATHEW, T. & RADHAKRISHNAN, P. (2010) Calibration of Microsimulation Models for Nonlane-Based Heterogeneous Traffic at Signalized Intersections. *Journal of Urban Planning and Development*. Disponível em: <http://10.1061/0733-9488>, p. 59-66.
- MAY, A. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

- MEHDI, R. F. & AFSHIN, S. M. (2019) A copula-based estimation of distribution algorithm for calibration of microscopic traffic models. *Transportation Research Part C.*, v. 98, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 449–470.
- MENNENI, S., SUN, C. E. & VORTISCH, P. (2008) Microsimulation calibration using speed-flow relationships. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2088, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 01-09.
- MOEN, B., FITTS, J., CARTER, D. & OUYANG, Y. (2000) *A Comparison of the VISSIM Model to Other Widely Used Traffic Simulation and Analysis Programs*. Presented at the Institute of Transportation Engineers 2000 Annual Meeting and Exhibit, Nashville, Tennessee, Estados Unidos.
- MON-MA, M. L. (2008) *Adaptação do HCM2000 para rodovias de pista simples com faixas adicionais típicas do estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- NAGUI, M. R. (2014) *A Unified Uninterrupted Speed Flow Relationship for Multilane Highway & Basic Freeway Segments for the HCM2010 Update*, NCHRP Project, Transportation Research Board, National research Council, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 03-115.
- NICHOLAS, L., ROD, J. & TUROCHY, E. (2019) *Calibration of Vissim Models for Rural Freeway Lane Closures: Novel Approach to the Modification of Key Parameters*. *Transportation Research Record*, 2673(5), p. 574-583.
- OLIVEIRA, M. L. & CYBIS, H. B. B. (2008) *Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira*. Anais da VIII Semana de Engenharia de Produção Sul Americana, SEPROSUL, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul.
- PARK, B. & SCHNEEBERGER, E. J. D. (2003) *Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: A Case Study of VISSIM for a Coordinated Actuated Signal System*. *Transportation Research Record* 1856, TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 185-192.
- PARK, B. B. & QI, H. (2005) *Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models*. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, v. 1934, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 208–217.
- PARK, B. & QI, H. (2006) *Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network: A Case Study of Vissim*. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada.
- PARK B. & KWAK, J. (2010) *Calibration Validation of TRANSIMS Microsimulator for an Urban Arterial Network*. *ESCE Journal of Civil Engineering*, 15(6), julho, Korean Society of Civil Engineers, Songpa-gu, Seul, Coreia, p. 1091-1100.

- PAULA, F. S. M. (2006) *Proposta de Adaptação da Metodologia do Highway Capacity Manual 2000 para Análise de Vias Arteriais Urbanas em Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará. 158 p.
- PAUL, W. E. & GUDMUNDUR, F. U. (2004) *Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models*. Handbook of Transport Geography and Spatial Systems, Handbooks in Transport, v. 5, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 203–236.
- PORTUGAL, L. S. (2005) *Simulação de tráfego: Conceitos e técnicas de modelagem*. Rio de Janeiro: Interciência Ltda. 198 p.
- PRASSAS, E. S. (1999) *Improving the Running Time in Highway Capacity Manual Table 11-4; Related Observations on Average Travel Speed*. Transportation Research Record 1678, TRB, National Research Council, Washington, D.C, Estados Unidos, p. 09–17.
- PTV (2017) *Planung Transport Verkehr. User Manual*. Planung Transport Verkehr AG, v. 11, Karlsruhe, Alemanha: PTV.
- RATROUT, N. T. & RAHMAN, S. M. (2008) A Comparative Analysis of Currently Used Microscopic and Macroscopic Traffic Simulation Software. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34 (1B), Dhahran, Arábia Saudita.
- RICHARD, D., PAUL, R. & BASTIAN, S. (2016) *Planning and Preliminary Engineering Applications Guide to the Highway Capacity Manual*. NCHRP Reporte 825, Project 07-22. Transportation Research Board, National research Council, Washington, D.C., Estados Unidos.
- RILETT, L. R. & KIM, K. (2001) *Automatic Calibration of the Surface Transportation and Supply Models Using ITS Data*. Paper to be published in Proceedings of the 9th World Congress on Transport Research, Seul, Coréia. paper number 4304.
- ROBERTSON, H. D., HUMMER J. E. & NELSON, D. C. (1994) *Manual of Transportation Engineering Studies*. New Jersey, USA: Prentice Hall Inc.
- ROESS, R. P. (2009) *Re-Calibration of the 75-mi/h Speed-Flow Curve and the FFS Prediction Algorithm for HCM 2010*. Research Memorandum, NCHRP Project 3-92. Polytechnic Institute of New York University, Brooklyn, N. Y, Estados Unidos, 16 p.
- ROESS, R. P. (2011) *Speed-Flow Curves for Freeways in the 2010 HCM*. 90th Annual Meeting of the TRB, Washington, DC, Estados Unidos.
- ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S., & MCSHANE, W. R. (2010) *Traffic Engineering*. 4th ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.
- ROMANA, M. G. (1994) *Evaluación práctica de niveles de servicio em carreteras convencionales de dos carriles em España*. Tese de Doutorado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha.

- SCHOEN, J.; MAY, A.; REILLY, W. & URBANIK, T. (1995) *Speed-Flow Relationships for Basic Freeway Segments*. Final Report, NCHRP Project 3-45, JHK & Associates, Tucson, AZ, Estados Unidos.
- SETTI, J. R. (2009) *Highway Capacity Manual ou um manual de capacidade rodoviária brasileiro?* Anais do 6º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, CBR&C 2009, Florianópolis, Santa Catarina.
- SMITH, M. C. & ADEL, W. S. (2006) *Challenges in calibrating large-scale microscopic simulation model of diverse urban, suburban, and rural networks: practical guide*. Presented at 85th TRB Annual Meeting, Washington, D.C., Estados Unidos.
- SPIEGELMAN, H. C.; PARK, S. & RILETT, L. R. (2010) *Transportation Statistics and Microsimulation*. London: Chapman & Hall.
- SNV (2019) Sistema Nacional de Viação. Brasília. Disponível em: [http://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAiNr?path=%20FSNV%20Planilhas%20\(2011-Atual\)%20\(XLS\)](http://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAiNr?path=%20FSNV%20Planilhas%20(2011-Atual)%20(XLS)). Acesso em: 15 jan. 2020.
- TARKO, A. P. (2000) *Analyzing Arterial Streets in Near-Capacity or Overflow Conditions* *Transportation Research Record 1710*. Transportation Research Board, Washington, D.C., Estados Unidos.
- TOLEDO, T. & KOUTSOPOULOS, H. N. (2004) Statistical Validation of Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos.
- TRB (2000) Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C., USA: National Research Council.
- TRB (2010) Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C., USA: National Research Council.
- TRB (2016) Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C., USA: National Research Council.
- TURLEY, C. (2007) *Calibration Procedure for a Microscopic Traffic Simulation Model*. Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo, Utah, Estados Unidos.
- YANG, S., OU, J., FENG, Y. & WANG, Y. (2019) Freeway travel time estimation based on the general motors model: a genetic algorithm calibration framework. *IET Intelligent Transport Systems*, 13(7). Disponível em: <http://10.1049/iet-its.2018.5540>. Acesso em: 15 jan. 2020. p. 1154-1163.
- YU, M. & FAN, W. D. (2017) Calibration of microscopic traffic simulation models using metaheuristic algorithms, *Int. J. Transp. Sci. Technol*, 6(1). Shanghai, China: Tongji University, Tongji University Press. p. 63–77

- WASHBURN, S. S. & COURAGE, K. G. (2003) *Facility Performance Model Enhancements for Multimodal Systems Planning Part I*. Transportation Research Center, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Florida, Estados Unidos.
- WASHBURN, S. S. & KIRSCHNER, D. S. (2006) Rural freeway level of service based on traveler perception. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1988, Washington, D.C., Estados Unidos, p. 31-37.
- WASHBURN, S. S., Y. YIN, MODI, V. & KULSHRESTHA, A. (2010) *Investigation of Freeway Capacity, Part B: Freeway Capacity Estimation for Florida Freeways*, Final Report. Transportation Research Center, University of Florida, Tallahassee, FL, Estados Unidos.
- WIEDEMANN, R. (1974) *Simulation des Stranverkehrs Ussets*. Technical report, Schriftenreihe des Instituts fr Verkehrswesen der Universit Karlsruhe. Karlsruhe, Alemanha: Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Transport Studies.
- WIEDEMANN, R. (1991) *Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads*. Advanced Telematics in Road Transport edited by the Comission of the European Community, DG XIII, Brussels, Bélgica.

APÊNDICE A – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

Esta seção apresenta os arquivos desenvolvidos em MATLAB que compõem a estrutura do algoritmo genético que foi incorporada ao Vissim para a extração de relatórios e consequentemente a calibração do modelo para os segmentos rodoviários estudados.

O programa foi escrito em MATLAB e está dividido em quatro sub-rotinas: a primeira *Conection*, em que se inicia o programa e abre ao arquivo do Vissim para a leitura e execução; a segunda *Main*, descreve o código do algoritmo genético para seleção de arquivos do Vissim que contém os dados para serem extraídos; a terceira *MER_1_2* e *MER_3_4*, abre os relatórios de volumes de veículos na entrada e no final de cada segmento, para o cálculo do erro entre os valores simulados e dados observados em campo e a quarta *RSR_CAR*, *RSR_BUS*, *RSR_VC1*, *RSR_VC2*, abre os relatórios de tempo médio de viagem para carros de passeio, ônibus, caminhões leves e caminhões pesados, para o cálculo do teste de Kolmogorov-Smirnov entre os dados de distribuições de velocidade simulado e observado.

A.1 Código *Connection*

```
vis=actxserver('VISSIM.vissim.1100');
vis.LoadNet('D:\MODELAGEM\segmento 12\Calibração\TESTE 2 CALIBRAÇÃO\BR-070 SEG 12
SCENARIOS COM ALTIMETRIA CALIBRAÇÃO_MODELO DE FLUXO.inpx');
vis.LoadLayout('D:\MODELAGEM\segmento 12\Calibração\TESTE 2 CALIBRAÇÃO\BR-070 SEG 12
SCENARIOS COM ALTIMETRIA CALIBRAÇÃO_MODELO DE FLUXO.layx');
sim=vis.Simulation;
step_time=1;
sim.set('AttValue', 'SimRes', step_time);
set(vis.Graphics.CurrentNetworkWindow, 'AttValue', 'QuickMode', 1);
vnet=vis.net;
datapoint=vnet.VehicleNetworkPerformanceMeasurement;
dv=vnet.DesSpeedDistributions;
```

A.2 Código *Main*

```
vnet=vis.net;
datapoint=vnet.VehicleNetworkPerformanceMeasurement;
dv=vnet.DesSpeedDistributions;
dim = 8;
nPop =30;
nInt =15;
taxa_crossover = 0.7;
taxa_mutacao = 0.3;
mi = 0;
sigma = 1;
tes=abs(0.02*rand(nPop,1));
tc=1;
```

```

to=2;
tv1=3;
tv2=4;
z_car=[0 0.073 0.309 0.499 0.705 0.881 0.977 1 0];
z_onibus= [0 0.065714 0.1843 0.465714 0.72 0.87 0.96 1 0];
z_VC1=[0 0.094286 0.251429 0.482857 0.66 0.83 0.961408 1 0];
z_VC2= [0 0.030263 0.122857 0.2716 0.474189 0.81 0.94 1 0];

for s=1:nPop

    car=v_inicio(z_car);
    populacao1=limites(car,z_car,tc);
    populacao(:,s)=populacao1;

    onibus=v_inicio(z_onibus);
    populacao_onibus1=limites(onibus,z_onibus,to);
    populacao_onibus(:,s)=populacao_onibus1;

    vc1=v_inicio(z_VC1);
    populacao_vc11=limites(vc1,z_VC1,tv1);
    populacao_vc1(:,s)=populacao_vc11;

    vc2=v_inicio(z_VC2);
    populacao_vc21=limites(vc2,z_VC2,tv2);
    populacao_vc2(:,s)=populacao_vc21;

end

format short;
todos_melhores = zeros(1,nInt);
parametros = zeros(nInt,8);
result_vehiculo=zeros(9,nInt);
result_onibus=zeros(9,nInt);
result_vc1=zeros(9,nInt);
result_vc2=zeros(9,nInt);

for i=1:nInt

    [populacao0 popu_onibus0 popu_vc1_0 popu_vc2_0] = fitness(populacao, populacao_onibus,
    populacao_vc1,populacao_vc2,nPop,dv,sim);
    populacao1 = crossover (populacao0,dim,nPop,taxa_crossover,mi,sigma);
    popu_onibus1 = crossover (popu_onibus0,dim,nPop,taxa_crossover,mi,sigma);
    popu_vc1_1 = crossover (popu_vc1_0,dim,nPop,taxa_crossover,mi,sigma);
    popu_vc2_1 = crossover (popu_vc2_0,dim,nPop,taxa_crossover,mi,sigma);
    populacao2= limites (populacao1,z_car,tc);
    populacao2_onibus= limites (popu_onibus1,z_onibus,to);
    populacao2_vc1= limites (popu_vc1_1,z_VC1,tv1);
    populacao2_vc2= limites (popu_vc2_1,z_VC2,tv2);
    populacao3 = mutacao (populacao2,dim,nPop,taxa_mutacao,mi,sigma);
    popu_onibus3=mutacao (populacao2_onibus,dim,nPop,taxa_mutacao,mi,sigma);
    popu_vc1_3=mutacao (populacao2_vc1,dim,nPop,taxa_mutacao,mi,sigma);
    popu_vc2_3=mutacao (populacao2_vc2,dim,nPop,taxa_mutacao,mi,sigma);
    populacao= limites (populacao3,z_car,tc);
    populacao_onibus= limites (popu_onibus3,z_onibus,to);
    populacao_vc1= limites (popu_vc1_3,z_VC1,tv1);
    populacao_vc2= limites (popu_vc2_3,z_VC2,tv2);
    melhores_veiculos =populacao(:,1);
    melhores_onibus=populacao_onibus(:,1);
    melhores_vc1=populacao_vc1(:,1);
    melhores_vc2=populacao_vc2(:,1);

```

```

    result_veiculo(:,i) = melhores_veiculos
    result_onibus(:,i) = melhores_onibus;
    result_vc1(:,i) = melhores_vc1;
    result_vc2(:,i) = melhores_vc2;

end

best=[melhores_veiculos melhores_onibus melhores_vc1 melhores_vc2];
save('resultado.mat','best')
plot(result_veiculo(9,:));
hold on;

```

A.3 Código MER_1_2

```

function [Erro_ponderado]= MER_1_2(t,z,xx, yy1,ti)
A=dir('*.rsr');
[nf Nf] = size(A);
cd (z)

for r=nf:nf

    v1_vc_car=0;
    v1_car=0;
    intervalo=0;
    v1_bus=0;
    v1_vc_bus=0;
    v1_vc1=0;
    v1_vc_vc1=0;
    v1_vc2=0;
    v1_vc_vc2=0;

    if nf<10
        s1 = xx;
        run= int2str(r);
        s2= strcat('00',run);
        s3='.rsr';
        s4='.mer';
    elseif nf>=100
        s1 = xx;
        run= int2str(r);
        s2= strcat("",run);
        s3='.rsr';
        s4='.mer';
    else
        s1 = xx;
        run= int2str(r);
        s2= strcat('0',run);
        s3='.rsr';
        s4='.mer';
    end

    filesim_mer=strcat(s1,s2,s4);
    dados1_mer=dlmread(filesim_mer,;',15,0);
    x = corre_dados(dados1_mer);
    [N n]= size(x);
    faixa=x(:,1);
    t_entrada=x(:,2);
    tipoveic=x(:,5);
    veloc=x(:,7);

```

```

inter = round(((t_entrada./300)+0.50));

for i=2:N-1

    for y=2:N-1

        if (faixa(y)<=3 && tipoveic(y) == 100) && (inter(y)== inter(i))
            v1_vc_car= veloc(y)+v1_vc_car;
            v1_car=v1_car+1;
        end
        if (faixa(y)<=3 && tipoveic(y) == 300) && (inter(y)== inter(i))
            v1_vc_bus= veloc(y)+v1_vc_bus;
            v1_bus=v1_bus+1;
        end
        if (faixa(y)<=3 && tipoveic(y) == 610) && (inter(y)== inter(i))
            v1_vc_vc1= veloc(y)+v1_vc_vc1;
            v1_vc1=v1_vc1+1;
        end
        if (faixa(y)<=3 && tipoveic(y) == 620) && (inter(y)== inter(i))
            v1_vc_vc2= veloc(y)+v1_vc_vc2;
            v1_vc2=v1_vc2+1;
        end
        if (tipoveic(y) == 100) && (inter(y)== inter(i))
            intervalo=inter(y);
        end
    end

    suma_vc=(v1_car+v1_bus+v1_vc1+v1_vc2);
    leves=v1_car;
    pesados= v1_bus+v1_vc1+v1_vc2;
    f_car=v1_car;
    f_bus=v1_bus;
    f_vc1=v1_vc1;
    f_vc2=v1_vc2;

    if v1_car>0
        VC=v1_vc_car/v1_car;
    else
        VC=0;
    end
    if v1_bus>0
        VB=v1_vc_bus/v1_bus;
    else
        VB=0;
    end
    if v1_vc1>0
        VV1=v1_vc_vc1/v1_vc1;
    else
        VV1=0;
    end
    if v1_vc2>0
        VV2=v1_vc_vc2/v1_vc2;
    else
        VV2=0;
    end

    tabela_1_2(intervalo,:)= [intervalo suma_vc f_car f_bus f_vc1 f_vc2 VC VB VV1 VV2 ];
    v1_car=0;

```

```

v1_vc_car=0;
v1_bus=0;
v1_vc_bus=0;
v1_vc1=0;
v1_vc_vc1=0;
v1_vc2=0;
v1_vc_vc2=0;
end

Tabela_1_2=tebela_1_2;
tabela_simulada=[tebela_1_2(:,3) (tebela_1_2(:,4)+ tebela_1_2(:,5)+ tebela_1_2(:,6))];
tabela_observada=dlmread(yy1);
tabela_maer = (abs(tabela_observada-tabela_simulada))./(tabela_observada);
conta_inf_1= sum(isinf(tabela_maer(:,1)));
conta_inf_2= sum(isinf(tabela_maer(:,2)));
xe=(size(tabela_maer([2:ti],1)));
y=xe(1,1);
media= [sum(tabela_maer([2:ti],1)./(y-conta_inf_1)) sum(tabela_maer([2:ti],2)./(y-conta_inf_2)) ];
media_v= sum(tabela_maer([2:ti],1)./(y-conta_inf_1))
media_p= sum(tabela_maer([2:ti],2)./(y-conta_inf_2))
Erro_ponderado= ((media_v*leves) + (media_p*pesados))/suma_vc
end

```

A.4 Código RSR_CAR

```
function [total soma]= RSR_CAR(t,z,xx,R,z_car)
```

```
A=dir('*.*rsr');
```

```
[nf Nf] = size(A);
```

```
cd (z)
```

```
for r=nf:nf
```

```
v1_car_40=0;
```

```
v1_car_60=0;
```

```
v1_car_80=0;
```

```
v1_car_90=0;
```

```
v1_car_100=0;
```

```
v1_car_110=0;
```

```
v1_car_125=0;
```

```
v1_car_mais=0;
```

```
total_dif=0;
```

```
if nf<10
```

```
s1=xx;
```

```
run= int2str(r);
```

```
s2= strcat('00',run);
```

```
s3='rsr';
```

```
elseif nf>=100
```

```
s1=xx;
```

```
run= int2str(r);
```

```
s2= strcat('',run);
```

```
s3='rsr';
```

```
else
```

```
s1=xx;
```

```
run= int2str(r);
```

```
s2= strcat('0',run);
```

```
s3='rsr';
```

```
end
```

```
filesim=strcat(s1,s2,s3);
```

```

    dados1=dlmread(filesim,',';9,0);
    x = corre_dados(dados1);
    [N n] = size(x);
    t_entrada=x(:,1);
    tipoveic=x(:,4);
    tempo=(x(:,5)./3600);
    veloc=((x(:,7)./1000)./tempo);
    inter = round(((t_entrada./300)+0.50));

for y=2:N-1
    if (veloc(y)<=40) & (x(y,4)==100)
        v1_car_40=v1_car_40+1;
    end
    if (veloc(y)<=50) & (x(y,4)==100)
        v1_car_60=v1_car_60+1;
    end
    if (veloc(y)<=60) & (x(y,4)==100)
        v1_car_80=v1_car_80+1;
    end
    if (veloc(y)<=70) & (x(y,4)==100)
        v1_car_90=v1_car_90+1;
    end
    if (veloc(y)<=80) & (x(y,4)==100)
        v1_car_100=v1_car_100+1;
    end
    if (veloc(y)<=90) & (x(y,4)==100)
        v1_car_110=v1_car_110+1;
    end
    if (veloc(y)<=100) & (x(y,4)==100)
        v1_car_125=v1_car_125+1;
    end
    if (veloc(y)<1000) & (x(y,4)==100)
        v1_car_mais=v1_car_mais+1;
    end
    if i==y
        intervalo=inter(i)-1;
    end
end
soma=v1_car_mais;
percent_40=v1_car_40/soma;
percent_60=v1_car_60/soma;
percent_80=v1_car_80/soma;
percent_90=v1_car_90/soma;
percent_100=v1_car_100/soma;
percent_110=v1_car_110/soma;
percent_125=v1_car_125/soma;
percent_mais=v1_car_mais/soma;
equacao=1.36*sqrt((v1_car_mais+R)/(v1_car_mais*R));
acumulada=[ percent_40 percent_60 percent_80 percent_90 percent_100 percent_110 percent_125
    percent_mais equacao ; z_car];
diferenca_car = [acumulada(1,:);acumulada(2,:); abs( acumulada(1,:)- acumulada(2,:))]
dif_acumulada= (acumulada(1,:)- acumulada(2,:));
for j=1:6
    if dif_acumulada(j)> equacao
        total_dif=(dif_acumulada(j)-equacao)+total_dif;
    end
end
total=total_dif ;
end

```

APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DAS VELOCIDADES DESEJADAS APÓS A CALIBRAÇÃO PARA OS SEGMENTOS ESTUDADOS

Esta seção mostra os melhores indivíduos durante a calibração do simulador, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov, apresentando os gráficos das distribuições de velocidades para as quatro categorias de veículos por segmento.

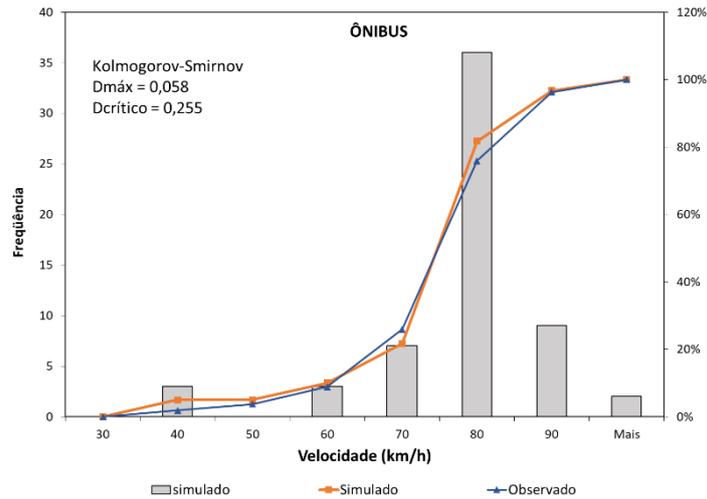


Figura B. 1 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 1

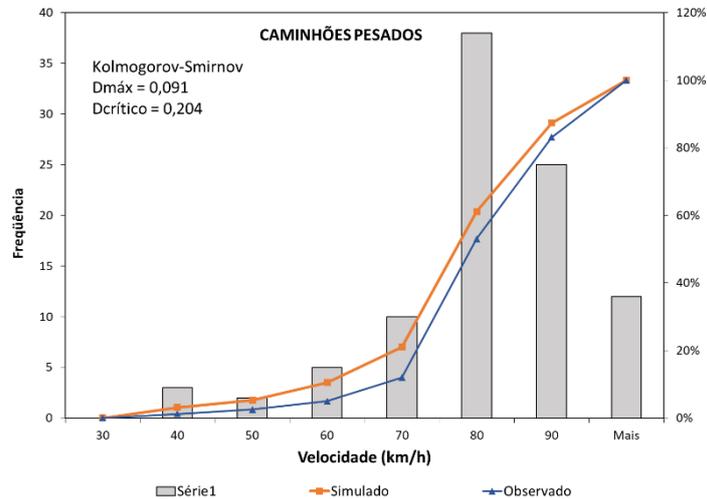


Figura B. 2 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 1

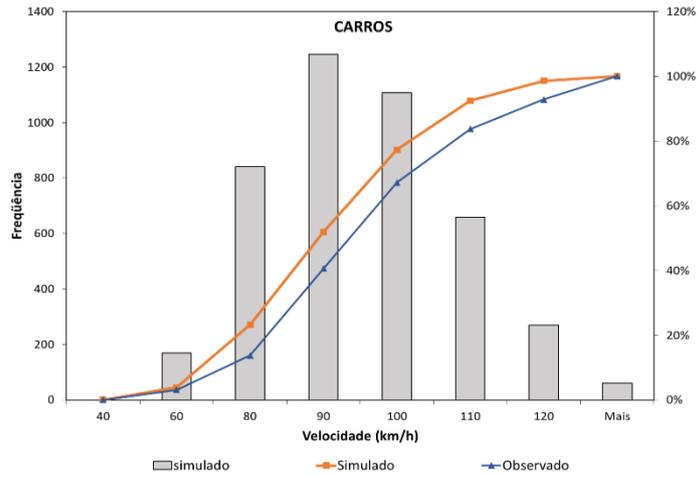


Figura B. 3 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 2

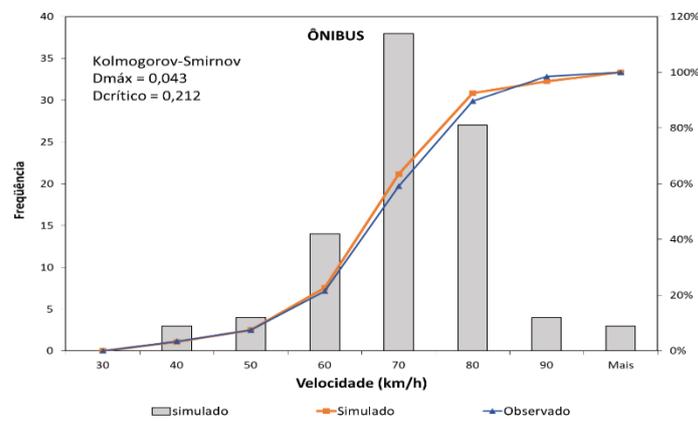


Figura B. 4 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 2

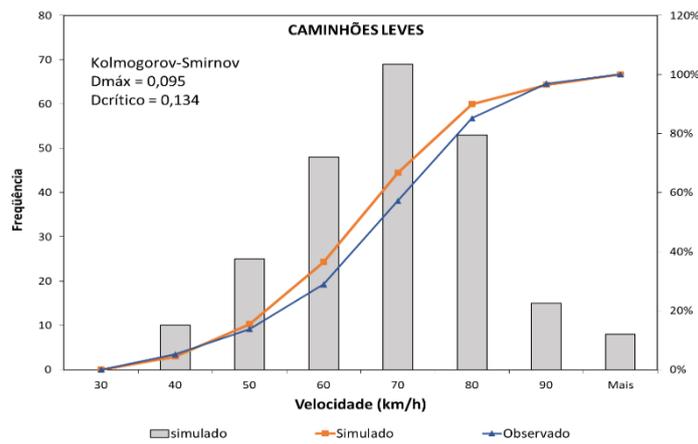


Figura B. 5 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 2

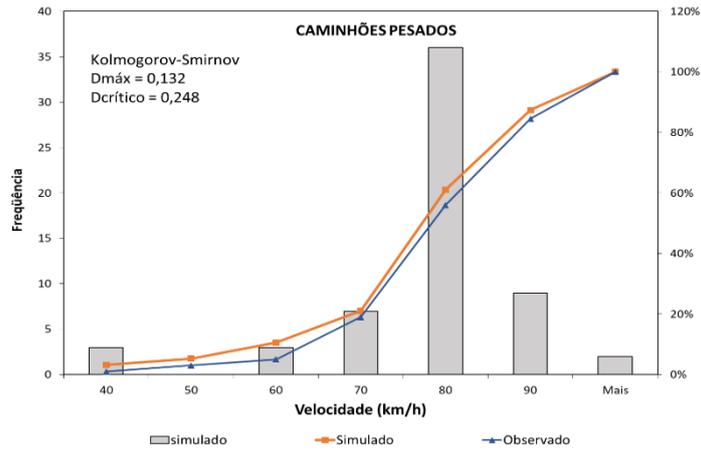


Figura B. 6 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 2

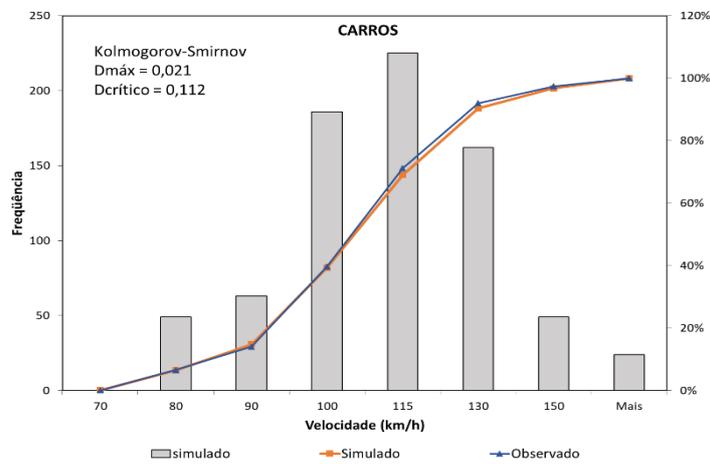


Figura B. 7 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 3

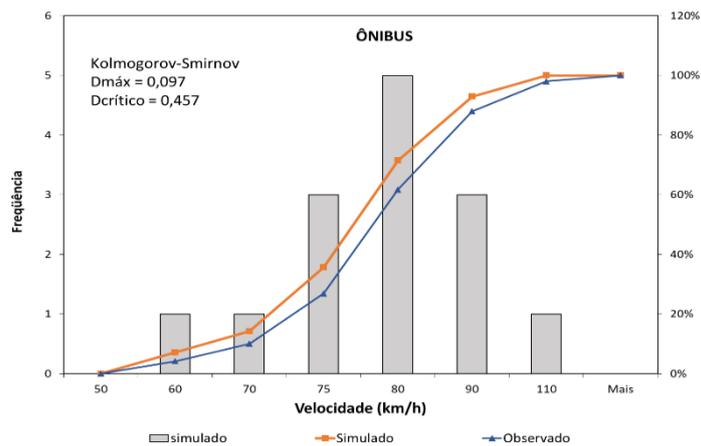


Figura B. 8 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 3

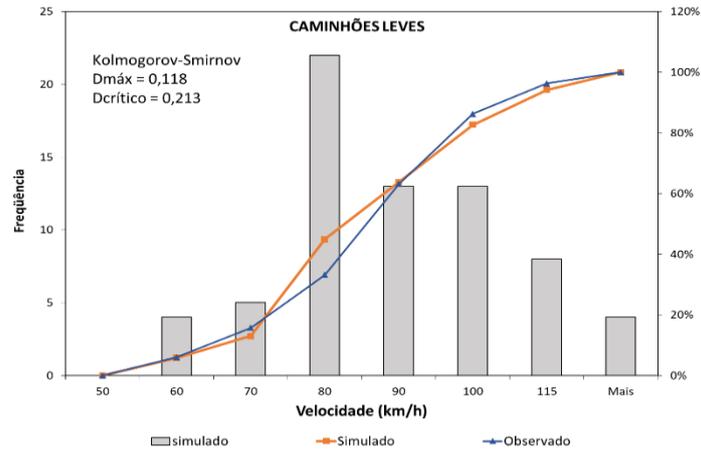


Figura B. 9 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 3

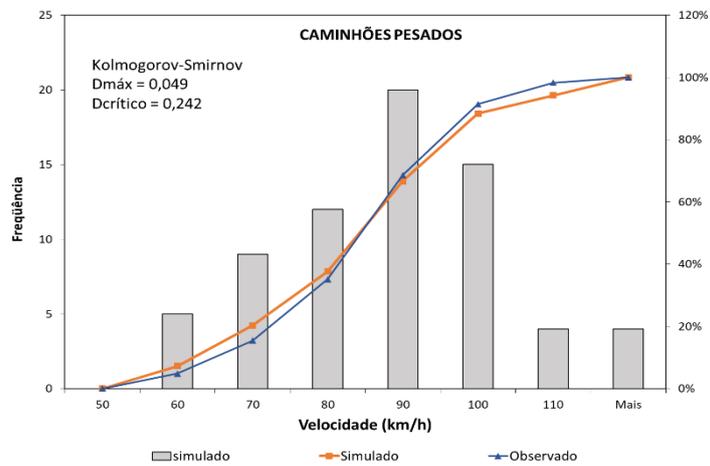


Figura B. 10 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 3

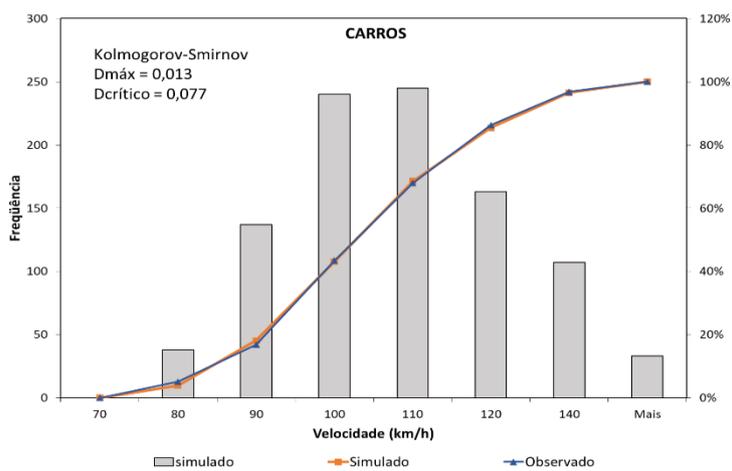


Figura B. 11 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 4

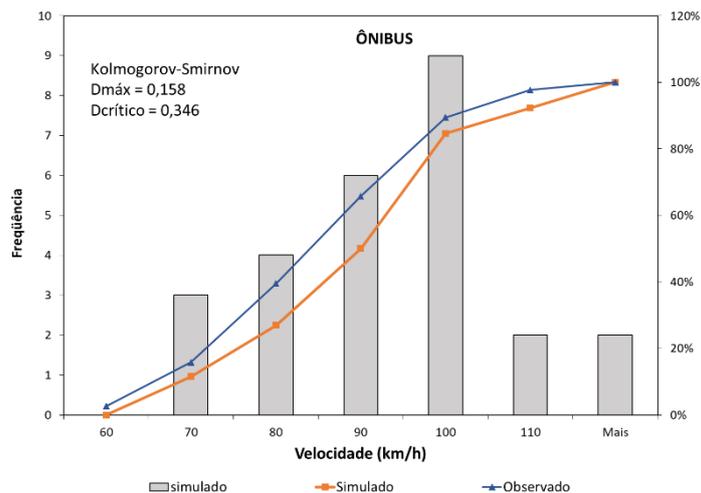


Figura B. 12 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 4

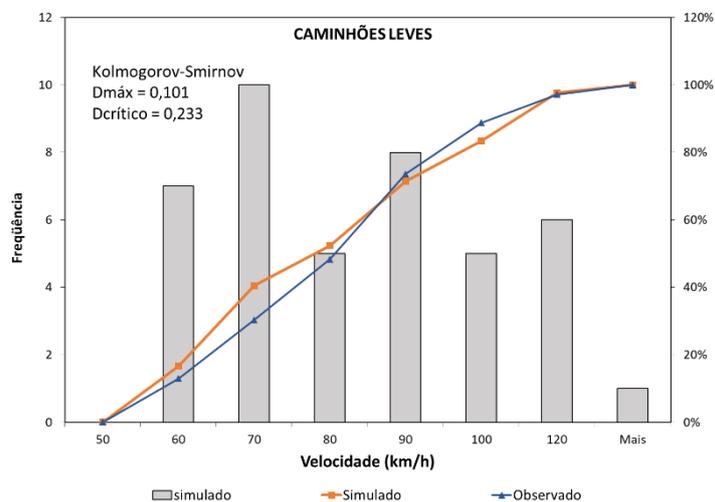


Figura B. 13 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 4

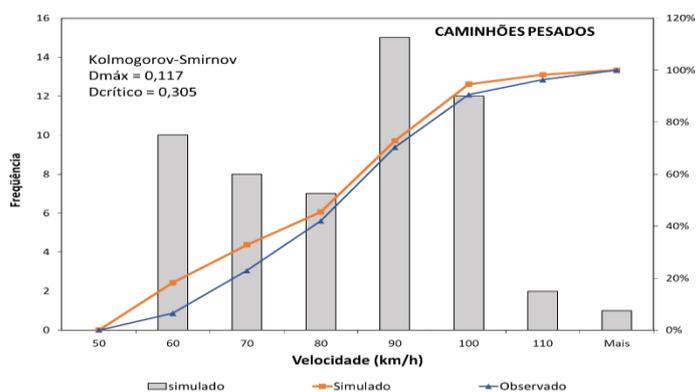


Figura B. 14 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 4

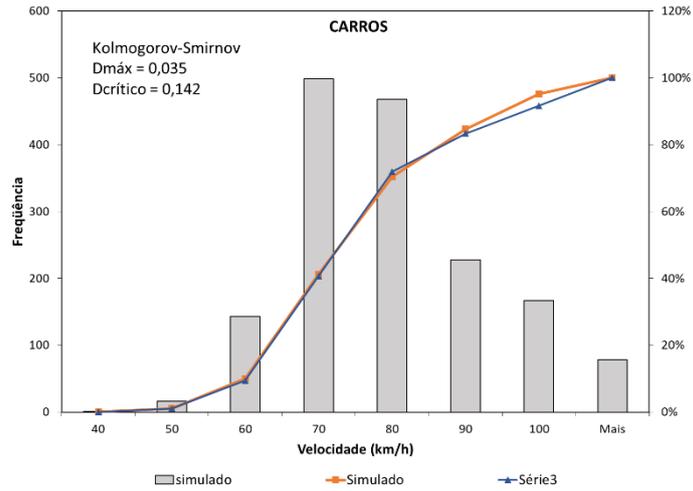


Figura B. 15 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 5

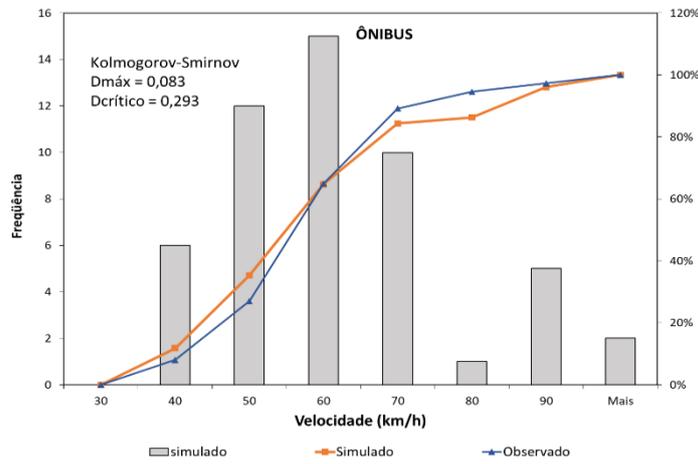


Figura B. 16 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 5

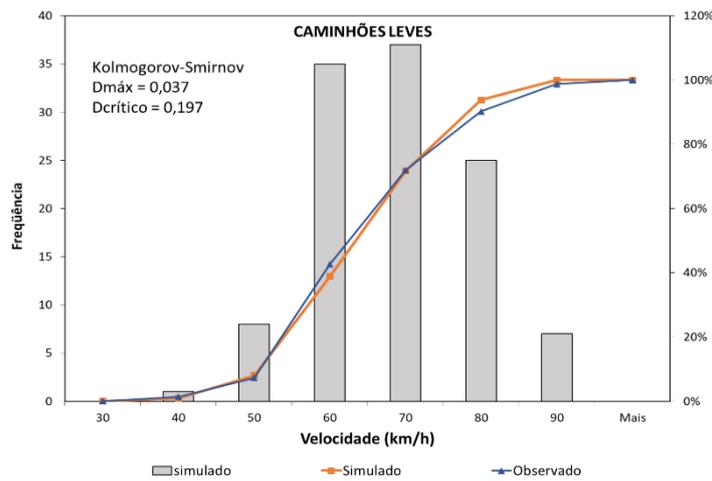


Figura B. 17 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 5

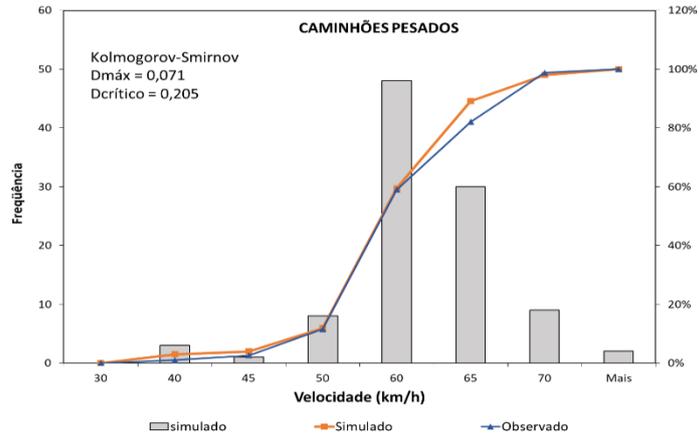


Figura B. 18 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 5

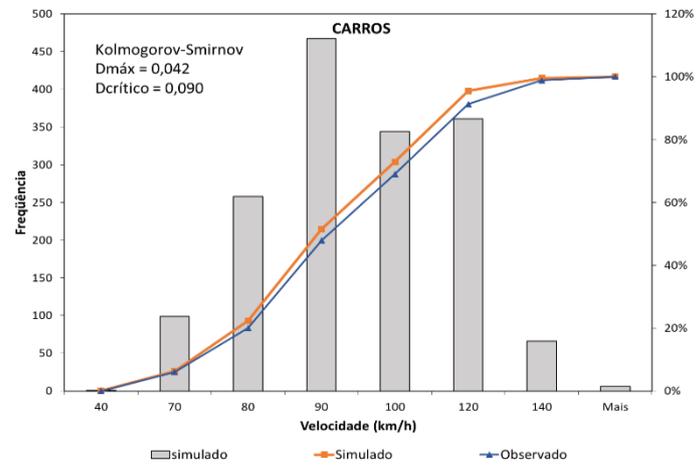


Figura B. 19 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 6

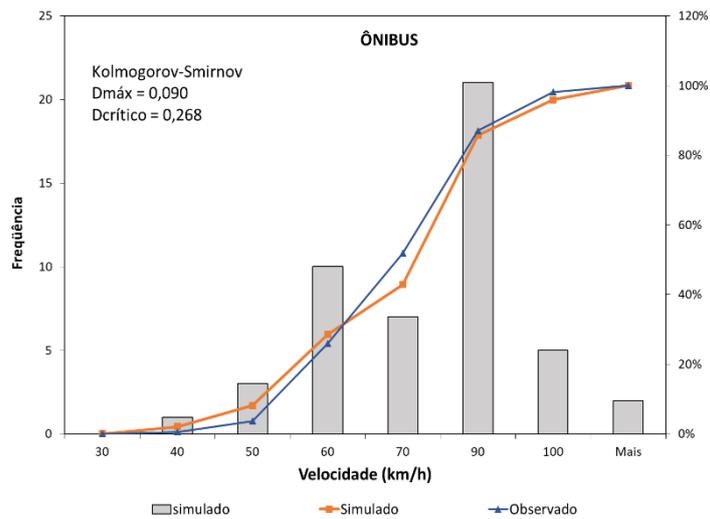


Figura B. 20 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 6

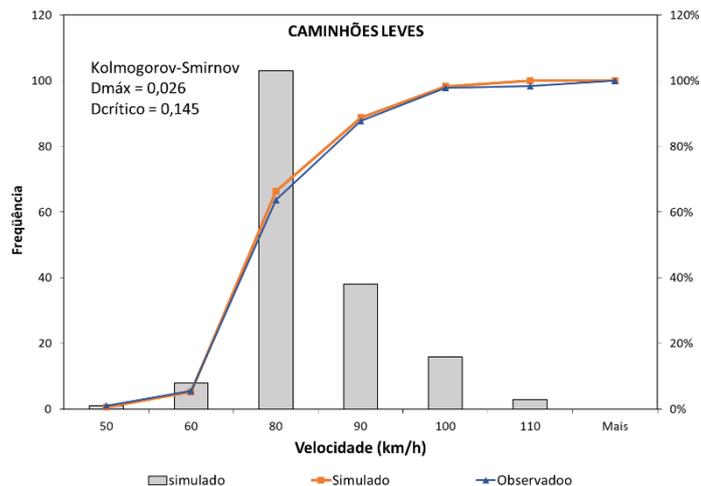


Figura B. 21 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 6

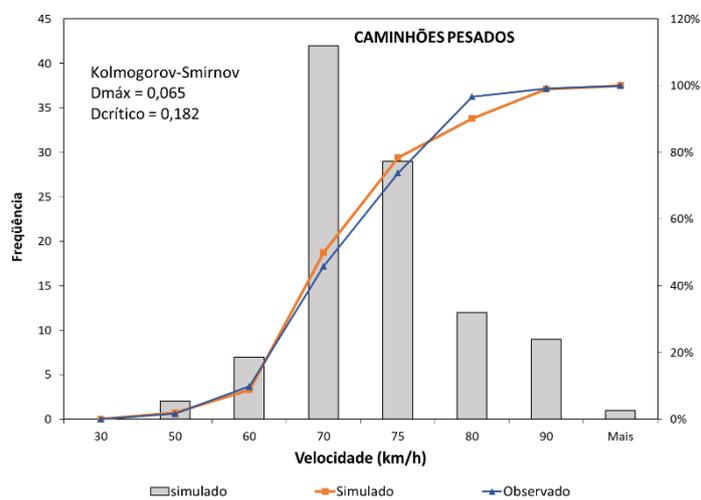


Figura B. 22 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 6

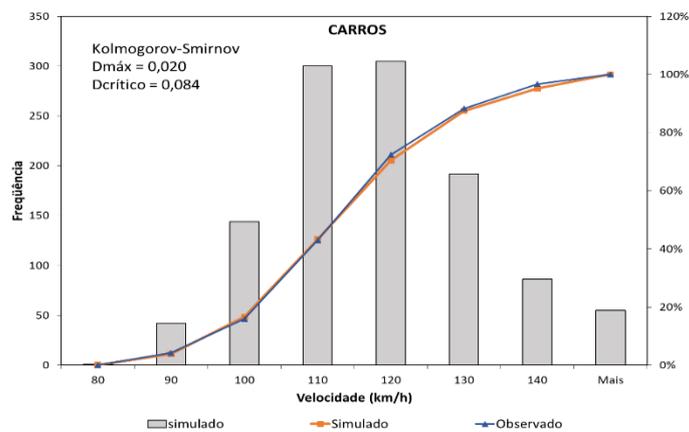


Figura B. 23 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 7

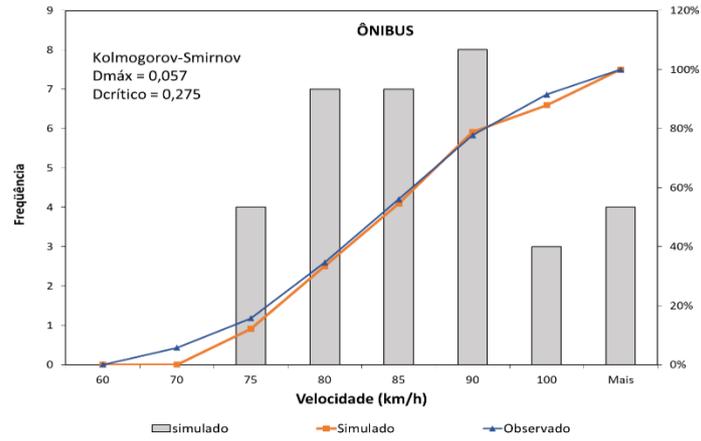


Figura B. 24 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 7

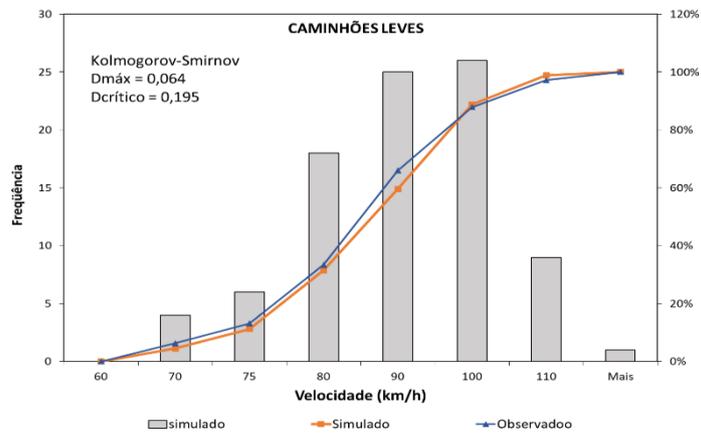


Figura B. 25 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 7

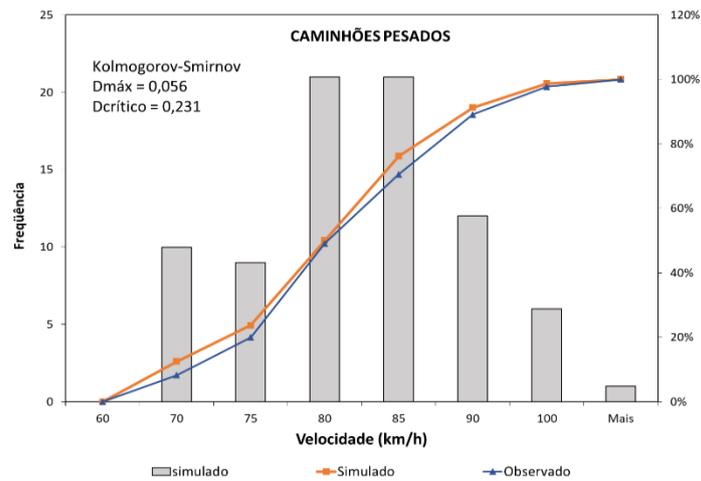


Figura B. 26 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 7

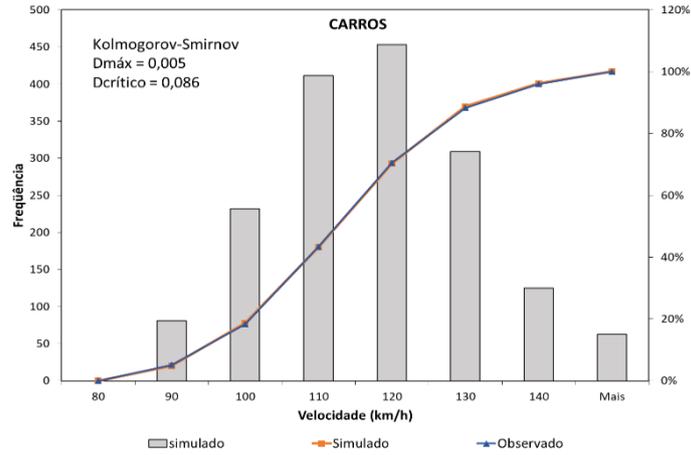


Figura B. 27 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 8

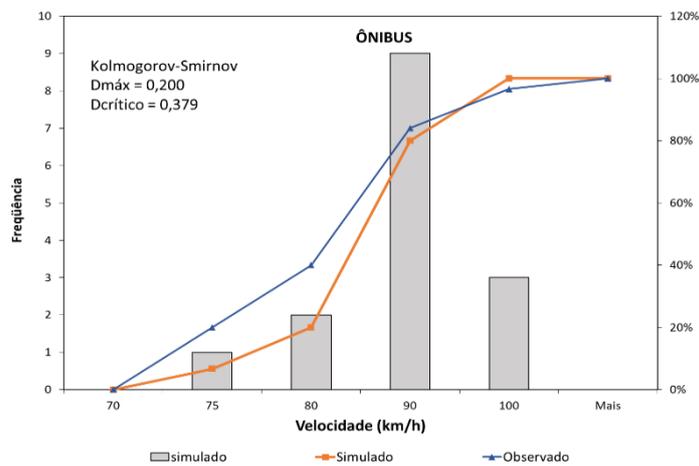


Figura B. 28 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 8

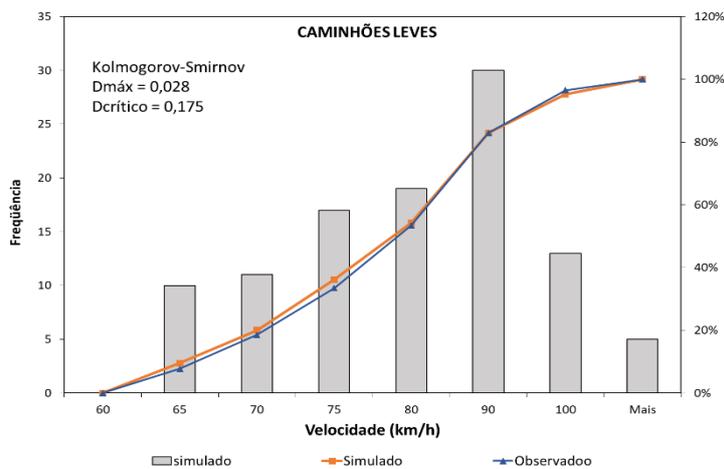


Figura B. 29 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 8

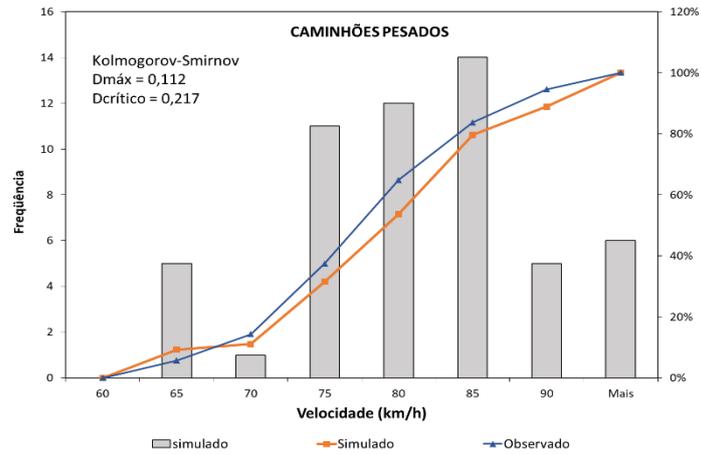


Figura B. 30 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 8

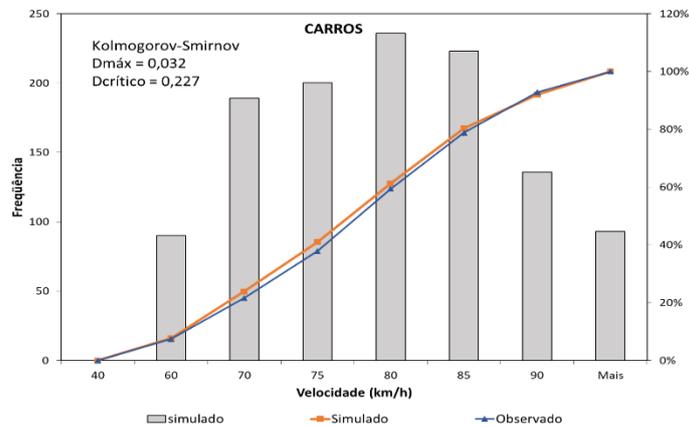


Figura B. 31 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 9

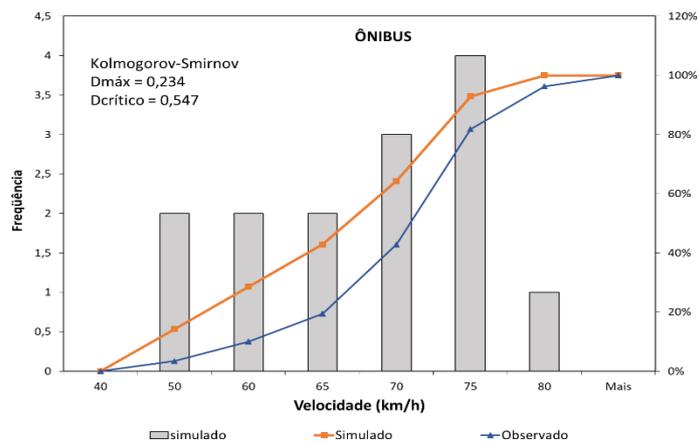


Figura B. 32 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 9

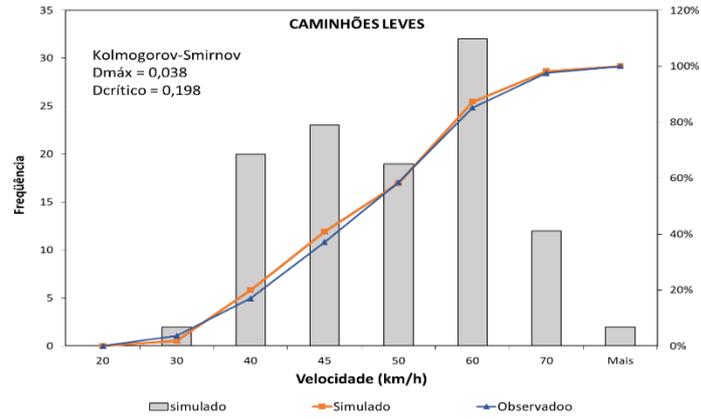


Figura B. 33 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 9

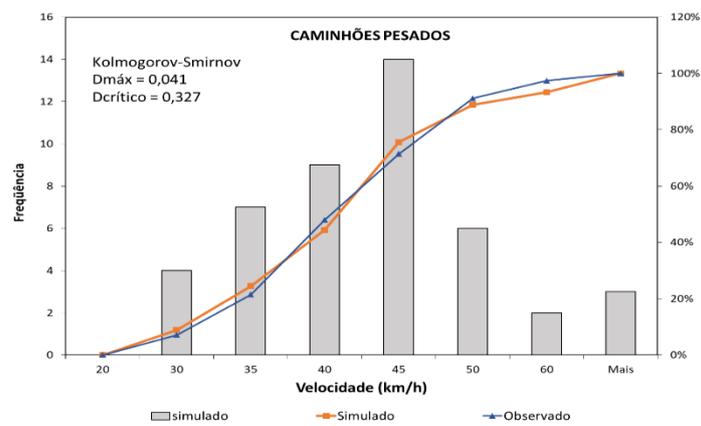


Figura B. 34 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 9

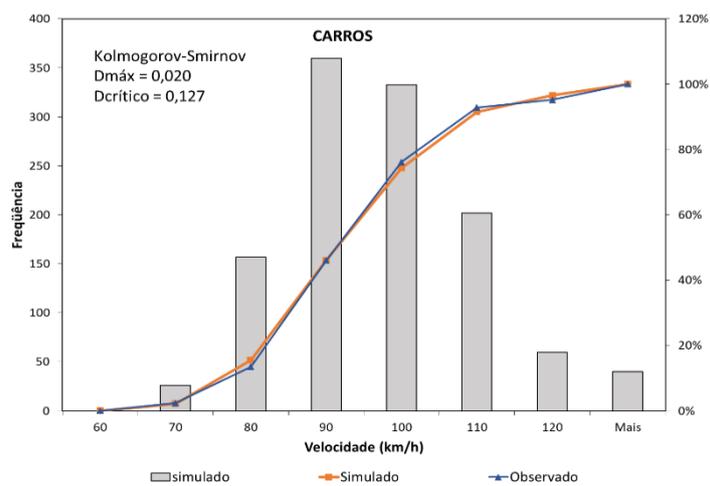


Figura B. 35 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 10

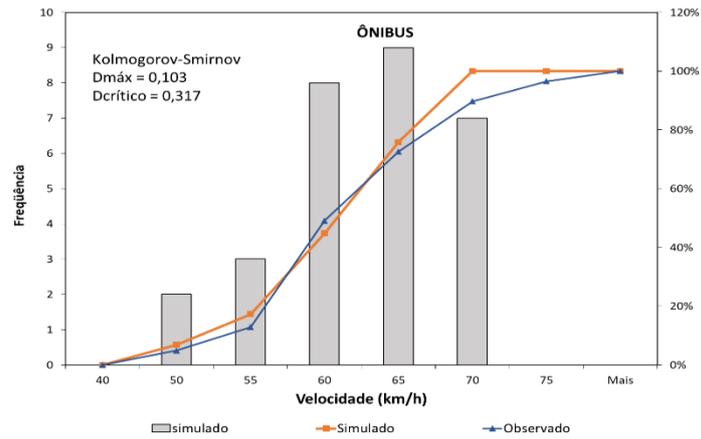


Figura B. 36 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 10

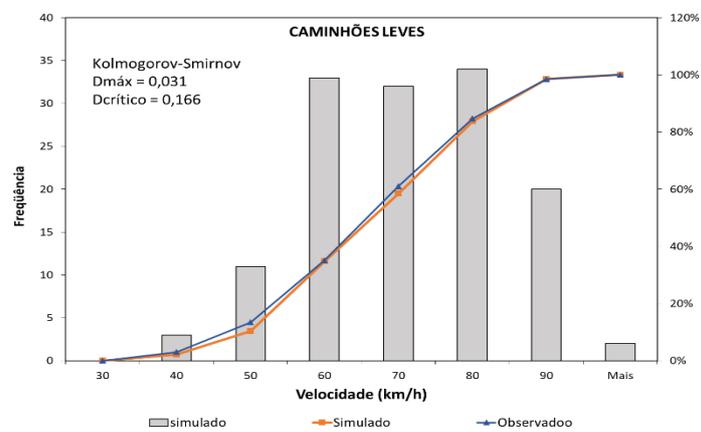


Figura B. 37 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 10

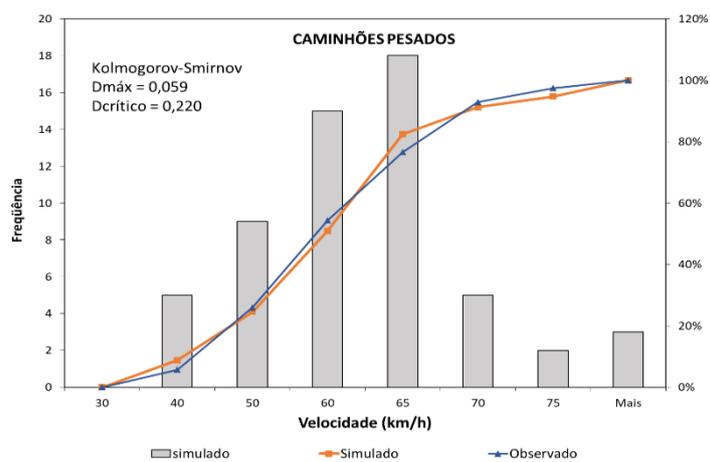


Figura B. 38 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 10

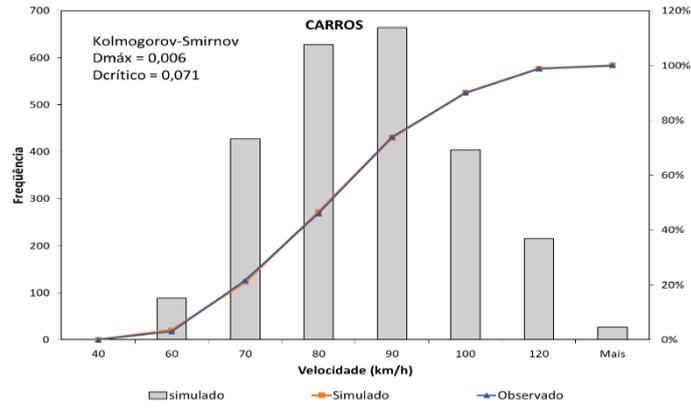


Figura B. 39 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 11

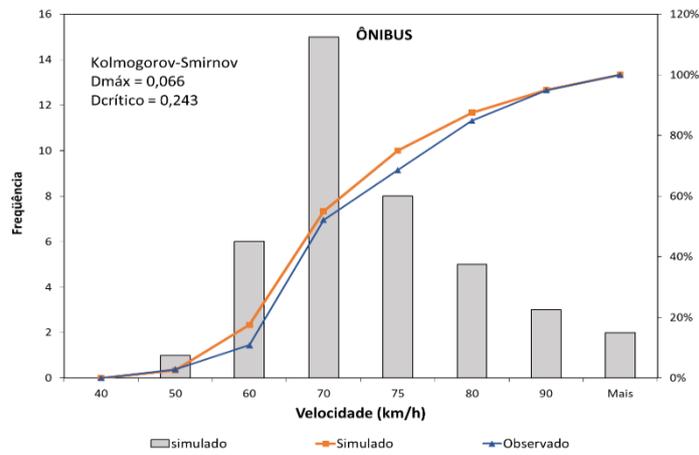


Figura B. 40 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 11

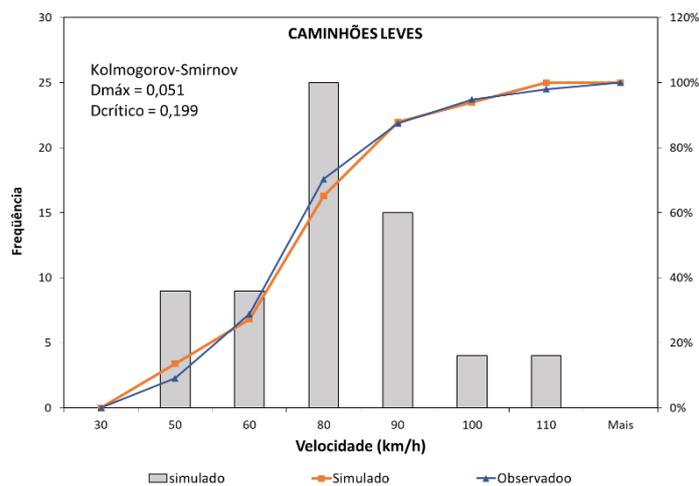


Figura B. 41 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 11

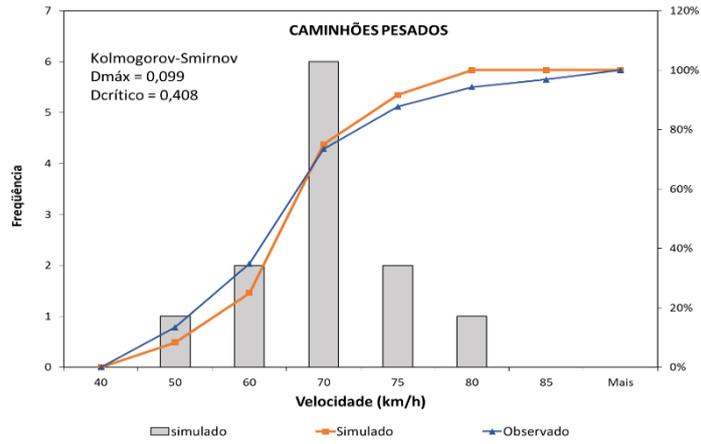


Figura B. 42 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 11

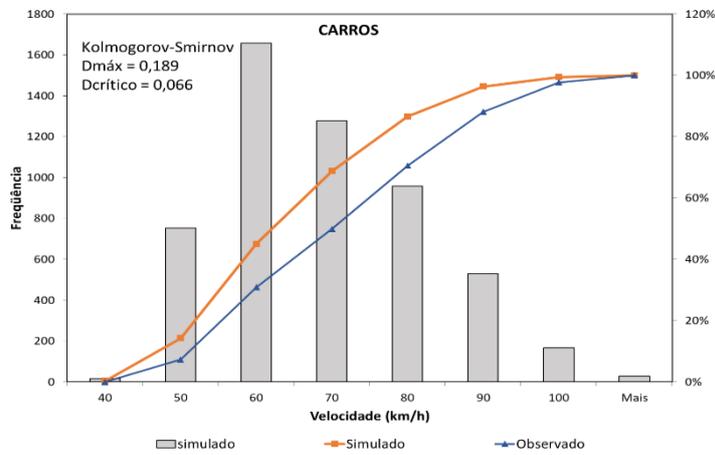


Figura B. 43 – Distribuição da velocidade de carro de passeio para o segmento 12

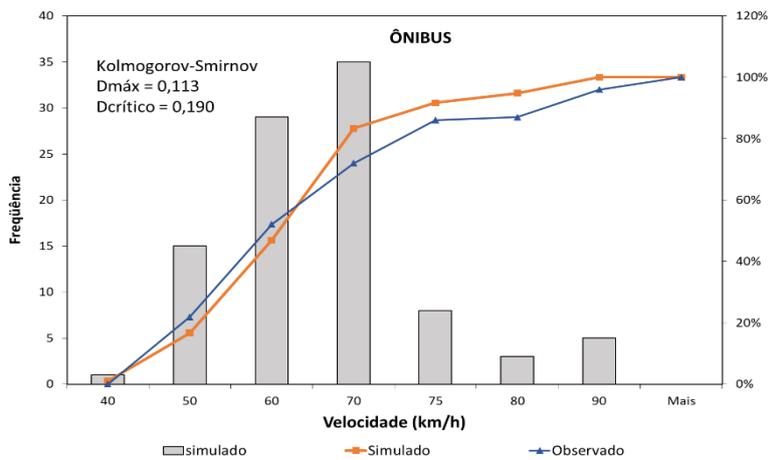


Figura B. 44 – Distribuição da velocidade de ônibus para o segmento 12

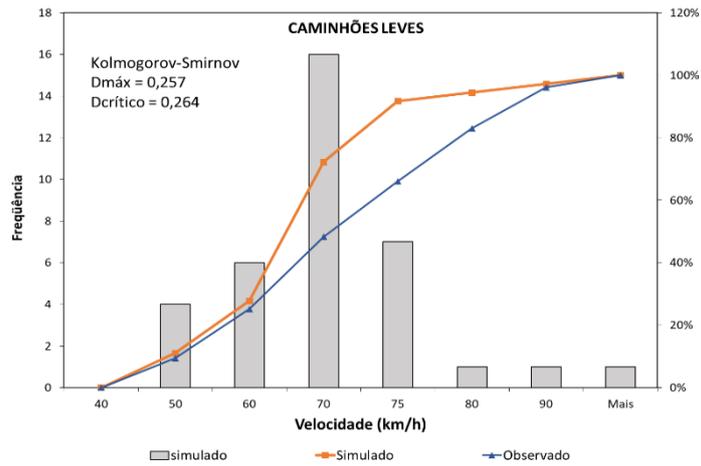


Figura B. 45 – Distribuição da velocidade de caminhões leves para o segmento 12

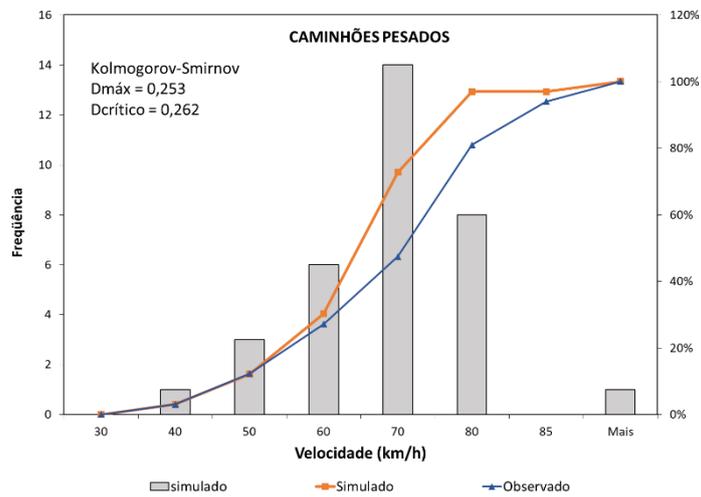


Figura B. 46 – Distribuição da velocidade de caminhões pesados para o segmento 12

APÊNDICE C – VOLUME DE TRÁFEGO

Esta seção apresenta os resultados dos volumes de tráfego obtidos para os 12 segmentos rodoviários estudados, a partir da aplicação da metodologia do dia útil típico proposto no Capítulo 5.

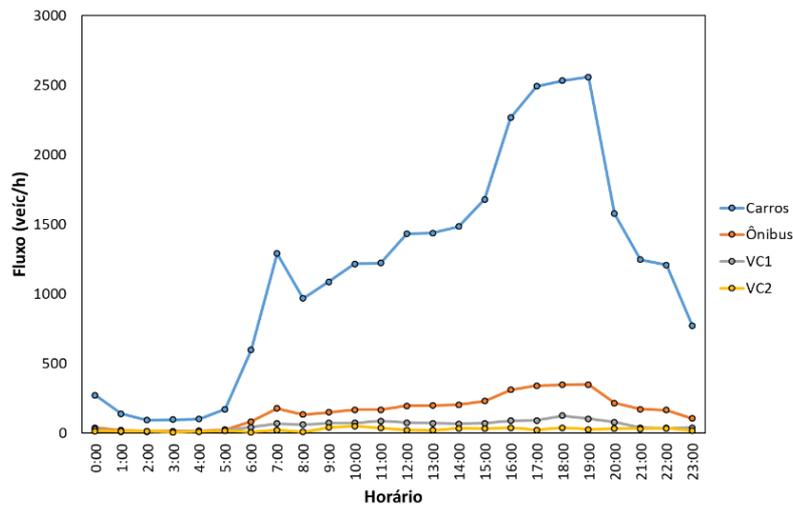


Figura C. 1 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 1

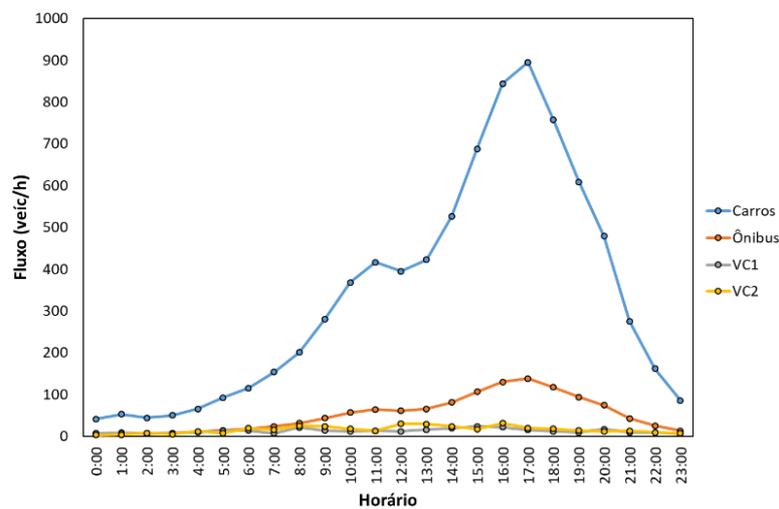


Figura C. 2 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 4

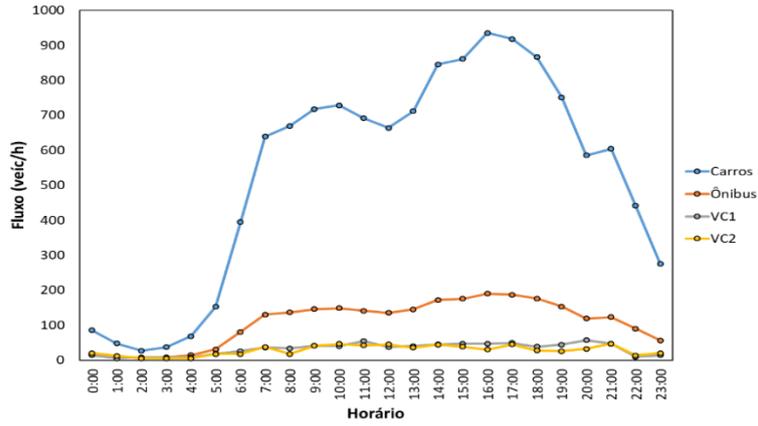


Figura C. 3 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 5

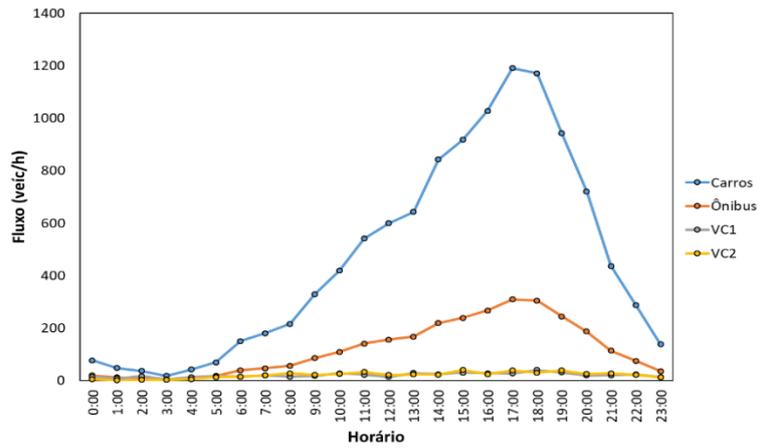


Figura C. 4 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 6

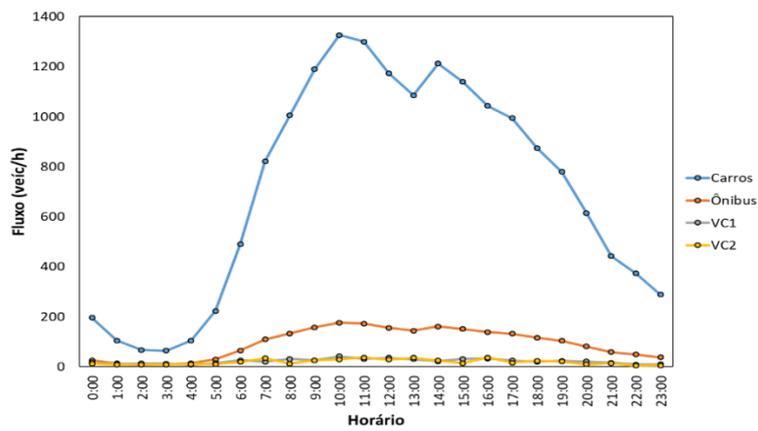


Figura C. 5 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 7

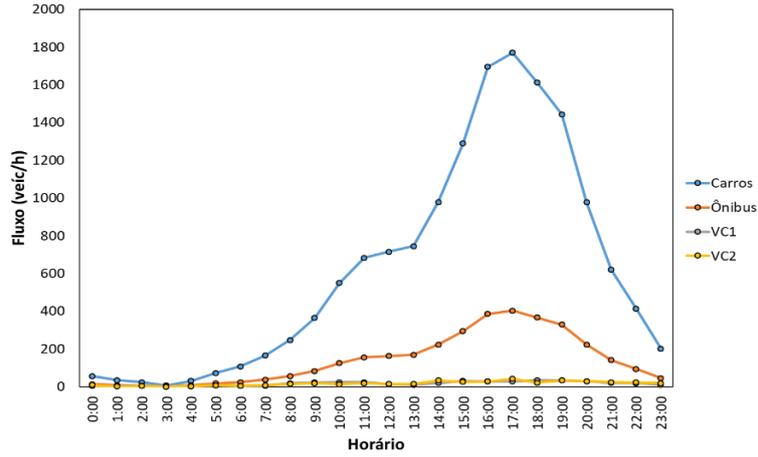


Figura C. 6 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 8

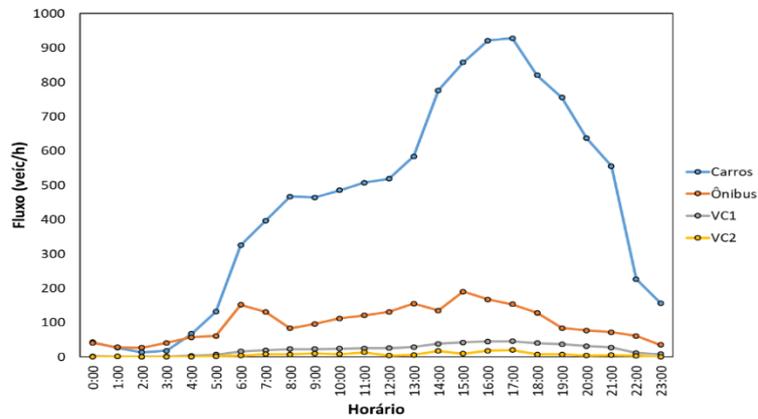


Figura C. 7 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 9

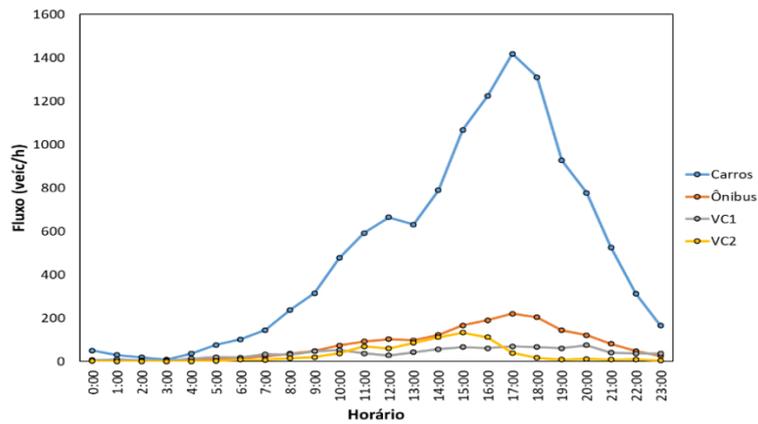


Figura C. 8 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 10

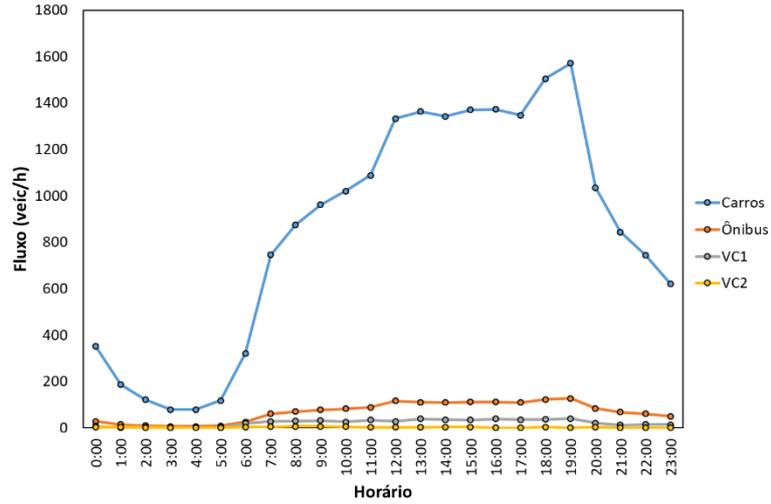


Figura C. 9 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 11

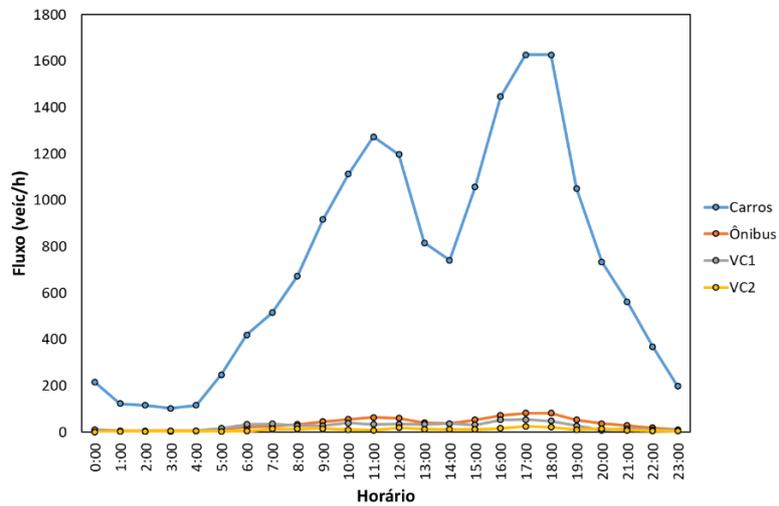


Figura C. 10 – Variação média da composição de tráfego em um dia típico do segmento 12

APÊNDICE D – RELAÇÕES FLUXO-VELOCIDADE OBTIDAS POR SIMULAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para todos os segmentos para os quais foi possível determinar a curva da relação fluxo-velocidade, com exceção daquelas já apresentadas no Capítulo 6.

Cada gráfico representa as curvas fluxo-velocidade completas, a capacidade que seria esperada para aqueles segmentos, proporcionando os valores obtidos para a capacidade C , a densidade na capacidade D_C , o ponto de transição BP e a forma da porção convexa do modelo fluxo-velocidade.

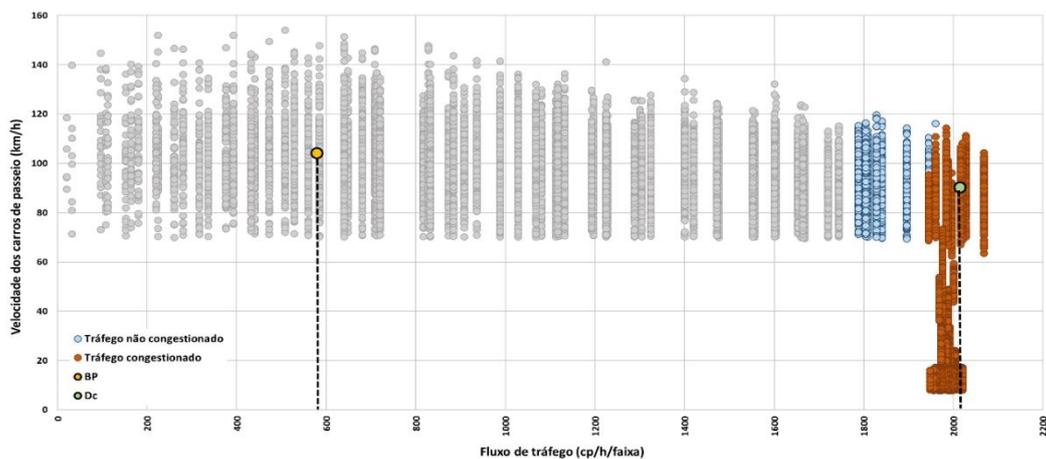


Figura D. 1 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 4

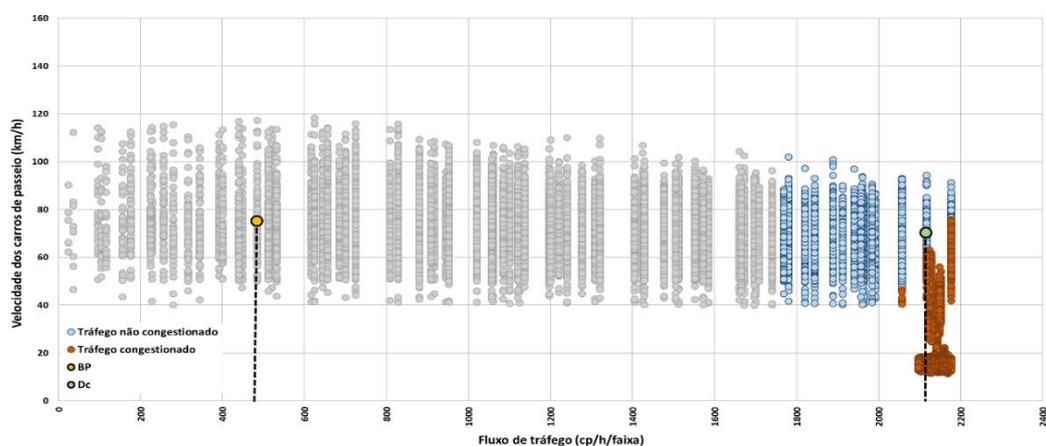


Figura D. 2 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 5

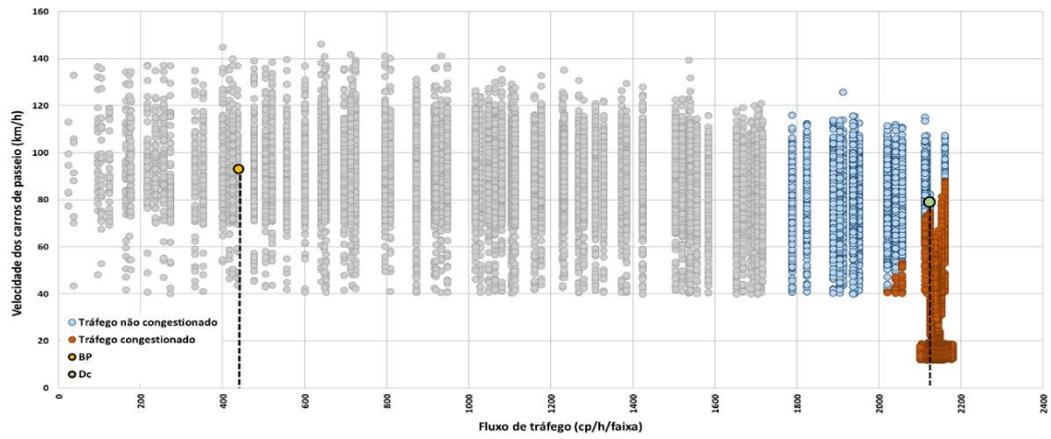


Figura D. 3 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 6

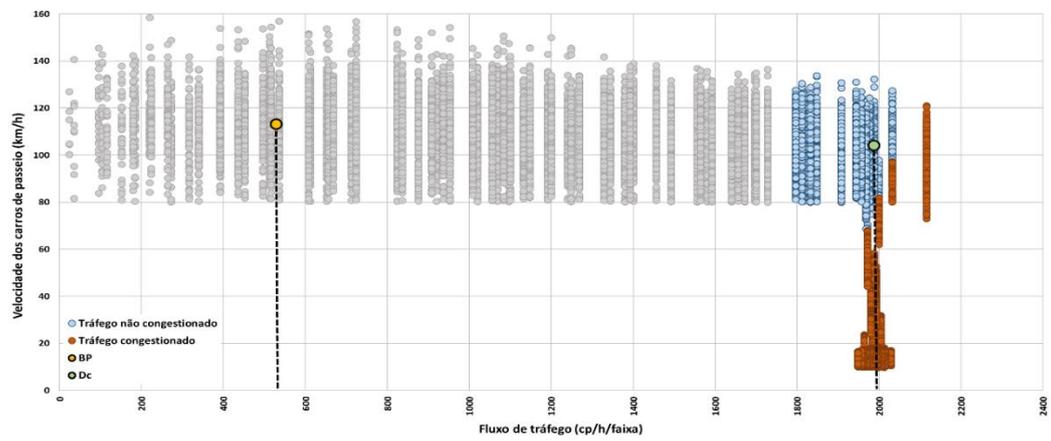


Figura D. 4 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 7

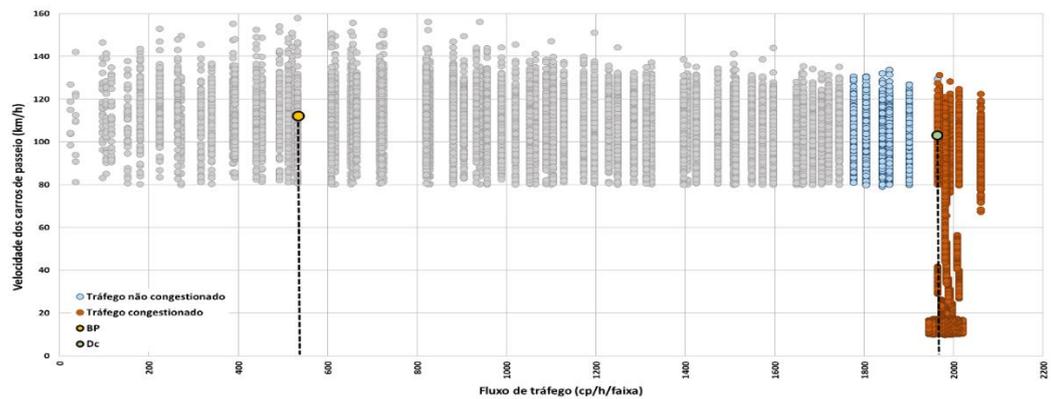


Figura D. 5 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 8

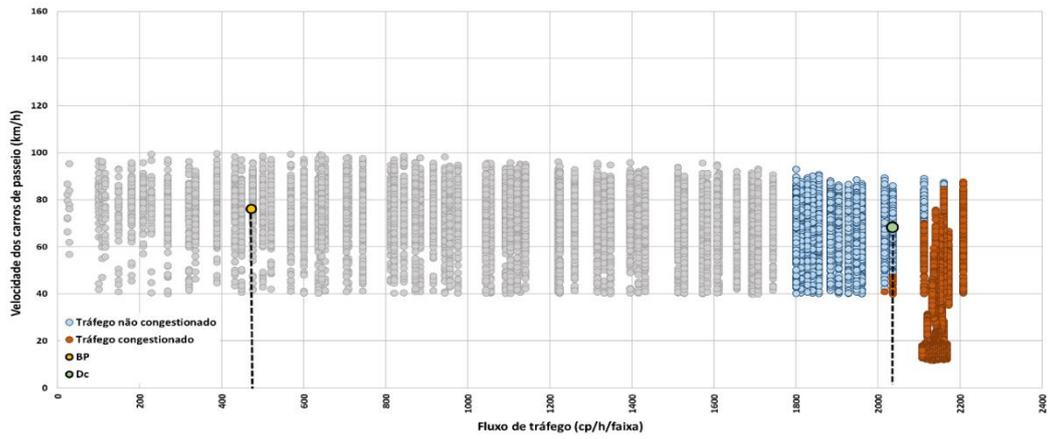


Figura D. 6 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 9

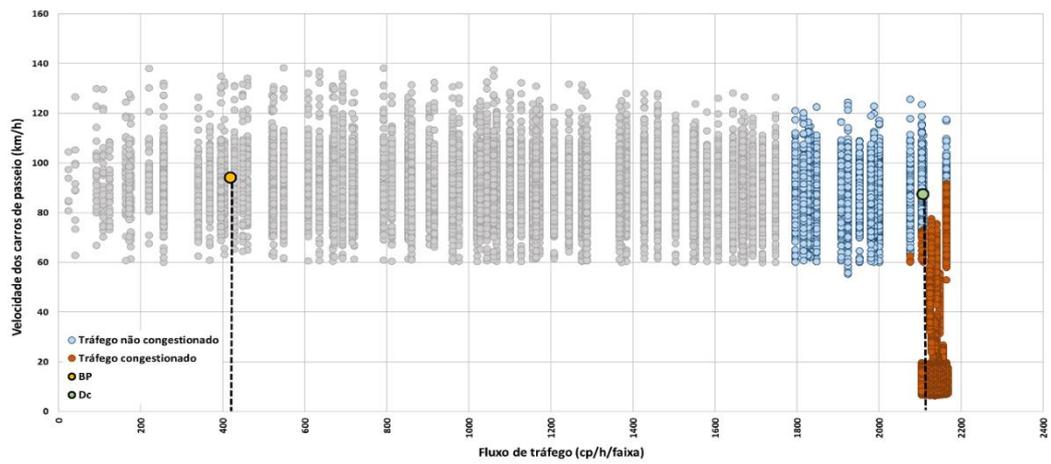


Figura D. 7 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 10

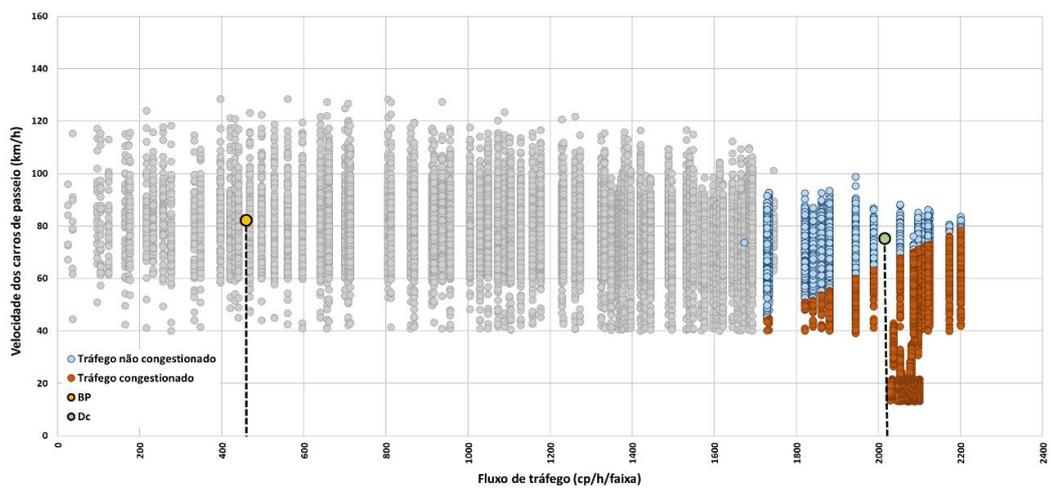


Figura D. 8 – Regimes de congestionamento e valores de BP e D_c para segmento 11