

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

**ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL DOS
VEÍCULOS EM TRECHOS VIÁRIOS DE RODOVIAS
RURAIS DE PISTA SIMPLES**

ANDRÉIA BARBOSA GONÇALVES

ORIENTADORA: MARIA ALICE PRUDÊNCIO JACQUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES

PUBLICAÇÃO: T.DM-005A/2011

BRASÍLIA/DF, JULHO/2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL DOS VEÍCULOS EM
TRECHOS VIÁRIOS DE RODOVIAS RURAIS DE PISTA SIMPLES**

ANDRÉIA BARBOSA GONÇALVES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO 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
MESTRE EM TRANSPORTES.

APROVADA POR:

PROF^a. MARIA ALICE PRUDÊNCIO JACQUES, PhD (UnB)
(ORIENTADORA)

PROF. JOSÉ MATSUO SHIMOISHI, Dr. Eng. (UnB)
(EXAMINADOR)

PROF. DANIEL SERGIO PRESTA GARCÍA, Dr.(UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 15 DE JULHO DE 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

GONÇALVES, BARBOSA ANDRÉIA

Estudo da Velocidade Operacional dos Veículos em Trechos Viários de Rodovias de Pista Simples. [Distrito Federal] 2011.

xvii, 118p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2011).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Velocidade Operacional

2. Rodovia de Pista Simples

3. Velocidade de Projeto

4. Índices de alinhamento geométrico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONÇALVES, A. B. (2011). Estudo da Velocidade Operacional dos Veículos em Trechos Viários de Rodovias de Pista Simples, Publicação T.DM-005A/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Andréia Barbosa Gonçalves.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo da Velocidade Operacional dos Veículos em Trechos Viários de Rodovias de Pista Simples.

GRAU: Mestre

ANO: 2011

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

Andréia Barbosa Gonçalves
SQN 406, Bloco M, apt. 108 – Asa Norte
70.847-130 Brasília – DF – Brasil.
andbargon@hotmail.com

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos avós, Izabel, Raimunda e Chagas
(in memória).*

Aos meus pais, Ângela e Paulo Elson.

Aos meus irmãos Ana, Guga e Rick.

A toda minha família Barbosa e Gonçalves.

Ao meu querido Warllen.

AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta dissertação não é tarefa fácil. O maior perigo do agradecimento seletivo não é decidir quem incluir, mas decidir quem não mencionar.

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado e por me guiar na realização deste trabalho.

À minha orientadora, Maria Alice, agradeço profundamente por ter assumido a orientação deste trabalho. Gostaria de salientar a minha admiração e reconhecimento pela forma como me orientou, pelo entusiasmo e interesse que sempre demonstrou, pela sua disponibilidade e pelo seu profissionalismo. Obrigada por todo o ensinamento que tive durante esse tempo que trabalhamos juntas.

Aos meus pais (Ângela e Elson) e irmãos (Ana, Guga e Rick), agradeço pelo amor, carinho, compreensão, apoio e confiança depositados nesta longa jornada. Aos meus pais também agradeço pela educação dada por todos esses anos e pelo apoio incondicional, por respeitarem as minhas escolhas e não medirem esforços para que elas fossem concretizadas. Henrique e Guga valeu mesmo pela ajuda.

Aos meus familiares, tios (as), primos (as) e agregados..., agradeço pela força, carinho e confiança. Em especial minhas avós, Izabel e Raimunda, pelas constantes orações.

Ao meu grande amigo e parceiro Warllen que, apesar das dificuldades causadas pela distância, esteve sempre ao meu lado, me confortando e estimulando para seguir em frente. Sem falar nas altas ajudas com a parte da informática no horário que fosse. Obrigada amorzinho, por tudo.

Aos meus colegas de mestrado da turma de 2009, seja pelo convívio diário nos estudos, pela preparação para as provas e listas, cafés, discussões e pelas ideias, qualquer agradecimento aqui ficará muito aquém do justo. Meu muito obrigada Ana Sheila, Poliana, Gustavo, Fernando, Berejuck, Pedro, Júlio Peruano, Daniel, Milena, Rodrigo Guimarães e Rodrigo Caudullo.

Aos queridos professores do PPGT-UNB, Paulo César, Joaquim, Yaeko, Carlos Henrique, Adelaida, José Augusto, e Sérgio, obrigada por todo aprendizado e conhecimento. Em especial, agradeço aos professores Pastor e Ricardo, por todas as conversas e por todo o apoio dado desde o começo. Agradeço também à Lu pela competência com a qual resolveu todas minhas questões burocráticas do PPGT e pelo carinho sempre demonstrado com um sorriso ao nos receber na secretaria.

Às amigas que fiz durante o mestrado Érica, Mariana e Roberta, obrigada por todo apoio.

Aos amigos do mestrado em Estruturas de Belém Nívea Gabriela, Guilherme Salazar, Kelly Nahum, Alexandre e Mikhail Luczynski, agradeço pelo tempo que passamos juntos,

aprendi muito com todos vocês. Nos divertimos muito, em meio a livros e noites mal dormidas.

Meu agradecimento mais que especial a minha grande e mais que querida amiga Ana Sheila, com ela aprendi muitas coisas, mas também ensinei a simplicidade de um Engenheiro, a você o meu muito obrigada por estar em todos os momentos difíceis e alegres que tive nesse tempo de mestrado.

À minha grande amiga e companheira de república Ivonne, obrigada pelo vários momentos agradáveis em que passamos no tempo em que convivemos na SQN 409.

Aos Engenheiros Rui e Murilo do DER/DF, agradeço por todo apoio e contribuição para a concretização deste trabalho.

Aos Topógrafos do DER/DF Joaquim e Stênio, agradeço pela colaboração dada a este trabalho.

Aos responsáveis pelos resultados, literalmente falando, deste trabalho Ana Sheila, Érica, Antônio, Benedito, Helder, Renato, Rodrigo, Henrique, Paulo, Fellipe, Patrícia, Francisco, Vitória, Éster, Carlos, Ernesto, Zélia, Carol, Sebastião, Adriana, Frederico, Maria, Edina, Santos, Leda, Juliana, João e Mário. A essas pessoas o meu muitíssimo obrigada, por terem se disposto a participar da pesquisa de campo.

Ao professor Daniel Garcia, examinador externo da banca, pelas contribuições e pela disposição em participar da banca. Ao professor Matsuo, agradeço pela participação na minha banca e pelas orientações.

Aos colegas do EB Romilson e Elisângela, pelo apoio e compreensão.

Aos professores da Graduação Maísa Tobias, João Mota e Andrea Conduru que em muito contribuíram, às vezes sem saber, para que eu chegasse ao Mestrado em Transportes.

Ao Fernando e Daniel, por terem me emprestado seus PalmTops e por toda a disposição em ajudar.

À Leila, Luciany, Marcelo, Jocilene, Michely, Giovana, Noêmia, Camila, Lara, Sandra, Sandro, Janete, Patrick, o meu muito obrigada.

À minha querida Jackeline, por ter contribuído tanto com as palavras de apoio durante as aulas de inglês, quanto pela contribuição direta dada a este trabalho.

Aos meus amigos de Belém, pelo apoio e por acreditarem em mim.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro, fundamental na conclusão deste trabalho.

RESUMO

ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL DOS VEÍCULOS EM TRECHOS VIÁRIOS DE RODOVIAS RURAIS DE PISTA SIMPLES

Os acidentes viários são apontados como uma das principais causas de morte no mundo. Isso justifica a importância que tem a segurança viária e como ela deve ser almejada tanto na fase de projeto como na operação da via. A velocidade operacional tem sido utilizada para avaliar a velocidade percebida pelos usuários como segura, quando o deslocamento dos veículos é condicionado apenas pelas condições de projeto da via, sendo possível por meio da mesma avaliar a consistência geométrica e definir limites de velocidade, contribuindo para a melhoria da segurança viária. Assim, tendo em vista a importância da velocidade operacional para a definição da velocidade regulamentar (limite) para a via e seus reflexos sobre a segurança dos usuários, é importante identificar como as características gerais da geometria viária afetam a velocidade operacional. A relevância nos aspectos de segurança e operação, torna necessário, também, o conhecimento das relações entre velocidade de projeto e velocidade operacional. Esta identificação contribui para o estabelecimento de velocidades limites mais realistas e que possam assim ser mais naturalmente obedecidas pelos usuários e, com isso, reduzir o número e a severidade dos acidentes em rodovias causados pelo fator velocidade. Para tanto, a análise deve levar em conta as características geométricas (alinhamento horizontal e vertical) e ambientais de trechos viários constituídos por diferentes segmentos homogêneos que compõem uma rodovia. Neste contexto, o presente trabalho se propôs, e efetivamente conseguiu, atingir os seguintes objetivos: estudar a velocidade operacional em trechos viários com base nas suas características geométricas, expressas em índices que refletem as condições gerais do alinhamento; desenvolver modelo de previsão da velocidade operacional, considerando as variáveis que refletem as características geométricas de cada trecho; e fazer uma análise crítica da velocidade operacional com relação à velocidade de projeto em cada trecho formado por um ou mais segmentos homogêneos.

Palavras chave: velocidade operacional, velocidade de projeto, rodovia rural e índices de alinhamento geométrico.

ABSTRACT

A STUDY OF OPERATING SPEED OF VEHICLES ON TWO-LANE RURAL HIGHWAY ROAD SECTIONS

Road accidents are one of the main causes of death worldwide. This in itself justifies the importance of road safety and how this issue should be taken into account during road projects and operation phases. Operating speed was used to evaluate the speed considered by drivers as safe, when vehicular displacement is conditioned only according to project conditions for the highway, thus it is possible to evaluate geometric consistence, define speed limits and hence contribute to improving highway safety. Given the importance of operating speed in determining highway speed limits and driver safety, it is important to identify how general highway geometry features can affect operating speed and the relevant aspects of safety and operation. Relevance of the relation between project speed and operating speed is necessary so as to establish more realistic speed limits to be obeyed by drivers, in order to reduce the number and severity of highway accidents caused by excess speed. The analysis should take into account geometric and environmental features (horizontal and vertical alignment) of road sections made up of different homogeneous segments that constitute a highway. In light of the above, this research study proposed, and effectively managed to meet the following objectives: the study of road sections based on the highway's geometric features expressed in indexes that reflect general alignment conditions; the development of a prediction model for operating speed bearing in mind the variables that affect each section's geometrical features and a critical analysis of operating speed in relation to project speed in each section made up of one or more homogeneous segments.

Key words: operating speed, project speed, rural highways and geometric alignment indexes.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
1. CAPÍTULO	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	4
1.3 JUSTIFICATIVA	4
1.4 HIPÓTESE.....	5
1.5 OBJETIVOS	5
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2. CAPÍTULO	7
VELOCIDADE DE PROJETO	7
2.1 ASPECTOS CONCEITUAIS.....	7
2.1.1 Definições adotadas em normas de outros países.....	7
2.1.2 Definição adotada na Norma Brasileira.....	9
2.2 CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DA VELOCIDADE DE PROJETO	9
2.2.1 Critérios adotados no exterior para a seleção de valores de velocidade de projeto	10
2.2.2 Critérios adotados no Brasil para a seleção de valores de velocidade de projeto	11
2.3 PRINCIPAIS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DETERMINADOS PELA VELOCIDADE DE PROJETO	12
2.3.1 Distância de visibilidade.....	13
2.3.2 Elementos do alinhamento horizontal	16
2.3.3 Elementos do alinhamento vertical.....	18
2.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	19
3. CAPÍTULO	20
VELOCIDADE OPERACIONAL	20
3.1 ASPECTOS CONCEITUAIS.....	20

3.2	PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA VELOCIDADE OPERACIONAL	22
3.2.1	Análise de Consistência Geométrica	22
3.2.2	Procedimentos para determinação da velocidade limite.....	28
3.3	TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	35
4.	CAPÍTULO	37
	MODELOS DE PREVISÃO DE VELOCIDADE OPERACIONAL	37
4.1	MODELOS DESENVOLVIDOS EM DIFERENTES PAÍSES	37
4.2	ÍNDICES DE ALINHAMENTO NA PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL	47
4.3	TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	49
5.	CAPÍTULO	51
	MÉTODO PARA ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL EM TRECHOS DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES.....	51
	MÉTODO PARA ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL EM TRECHOS DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES.....	52
5.1	PRIMEIRA ETAPA: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA	53
5.2	SEGUNDA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO	55
5.3	TERCEIRA ETAPA: DESCRIÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO.....	55
5.4	QUARTA ETAPA: COLETA DE DADOS DE VELOCIDADE.....	61
5.4.1	Tamanho da Amostra.....	61
5.4.2	Métodos de coleta de dados.....	63
5.5	QUINTA ETAPA: ANÁLISE DE DADOS	65
6.	CAPÍTULO	68
	ESTUDO DE CASO: RODOVIA DF-250.....	68
6.1	PRIMEIRA ETAPA: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA	68
6.2	SEGUNDA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO	70
6.3	TERCEIRA ETAPA: DESCRIÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO.....	72
6.4	QUARTA ETAPA: COLETA DE DADOS DE VELOCIDADE.....	76
6.4.1	Tamanho da Amostra.....	76
6.4.2	Coleta de dados de velocidade	81
6.5	QUINTA ETAPA: ANÁLISE DE DADOS	85
6.6	TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	89
7.	CAPÍTULO	90

ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL COM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS DOS TRECHOS.....	90
7.1 Análise inicial das variáveis através do diagrama de dispersão	90
7.2 Análise da correlação linear entre V_{85} e as variáveis independentes e destas entre si	91
7.3 Estudo da relação linear entre a V_{85} e as variáveis independentes consideradas.....	93
7.4 Determinação de um modelo de previsão da V_{85} para a rodovia estudada.....	97
7.5 TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	106
8. CAPÍTULO	107
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	107
8.1 PRINCIPAIS RESULTADOS.....	108
8.2 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DO ESTUDO	108
8.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXO 1.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Definições de velocidade de projeto da AASHO/AASHTO.....	8
Tabela 2.2: Velocidade de Projeto.....	10
Tabela 2.3: Velocidade de projeto ou diretriz (km/h)	11
Tabela 2.4: Relação entre velocidade de projeto e elementos de projeto.....	13
Tabela 2.5: Distância de Visibilidade de Parada	14
Tabela 2.6: Velocidade média (para dias de chuva) em função da velocidade de projeto. 15	
Tabela 2.7: Distância de Visibilidade para Tomada de Decisão (m)	15
Tabela 2.8: Valores de Projeto Estabelecidos pelo DNER para as Distâncias de Visibilidade de Ultrapassagem.	16
Tabela 2.9: Valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito transversal ($f_{m\acute{a}x}$).	17
Tabela 2.10: Valores dos raios mínimos em função das taxas máximas de superelevação (em metros).....	17
Tabela 2.11: Declividades Máximas para Rodovias Rurais.	18
Tabela 3.1: Classificação segundo a composição dos critérios I, II e III.	27
Tabela 3.2: Diretrizes Básicas para Regulamentação da Velocidade Máxima Permitida para vias Rurais.	30
Tabela 3.3: Diretrizes Básicas para Regulamentação da Velocidade Máxima Permitida para vias Urbanas.....	31
Tabela 3.4: Comprimentos mínimos dos segmentos para efeito de definição da velocidade limite.....	32
Tabela 4.1: Modelos de Previsão da Velocidade Operacional.....	39
Tabela 4.2: Índices do alinhamento.....	48
Tabela 5.1: Exemplo de tabulação dos dados de descrição dos trechos de estudo.....	60
Tabela 5.2: Desvio padrão para determinação do tamanho da amostra em estudos de velocidade local.	61
Tabela 5.3: Valores da Constante K.	62
Tabela 5.4: Constante correspondente a percentis da velocidade.	62
Tabela 6.1: Principais Características do Alinhamento Horizontal, Vertical e da Seção Transversal.....	69
Tabela 6.2: Síntese dos dados de descrição dos trechos de estudo para sentido 1.....	74
Tabela 6.3: Síntese dos dados de descrição dos trechos de estudo para o sentido 2.....	75

Tabela 6.4: Resultado do teste de hipótese referente à igualdade das velocidades médias nos dois sentidos de cada trecho.....	77
Tabela 6.5: Valores do erro para o desvio padrão real e número real de amostras.	80
Tabela 7.1: Avaliação qualitativa do Coeficiente de Pearson.....	92
Tabela 7.2: Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson.	92
Tabela 7.3: Resumo dos modelos lineares usados para identificar as variáveis intervenientes na V_{85} para a rodovia estudada.....	95
Tabela 7.4: Resumo dos modelos adicionais estudados para a base de dados completa. ..	97
Tabela 7.5: Trechos-sentidos integrantes da base de dados.	98
Tabela 7.6: Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson.	100
Tabela 7.7: Resumo dos modelos lineares usados para identificar as variáveis intervenientes na V_{85} para a rodovia estudada.....	101
Tabela 7.8: Resumo dos modelos adicionais estudados para a base de dados reduzida. .	103
Tabela 7.9: Dados dos trechos analisados no processo de validação dos modelos.....	104
Tabela 7.10: Resultados da verificação da validação dos Modelos 7 e 9.	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Distribuição da malha rodoviária federal no Brasil. Fonte: DNIT, 2010.....	2
Figura 3.1: Ilustração do termo “ <i>headway</i> ”	21
Figura 3.2: Curva de Distribuição de Frequência Acumulada de Velocidades com Indicação da Velocidade Operacional (V_{85}). Fonte: DER/SP, 2006.	21
Figura 3.3: Limite ótimo de velocidade	33
Figura 5.1: Estrutura Geral do Método da Pesquisa.....	52
Figura 5.2: Exemplo para determinação do fator relacionado às rampas verticais ascendente e descendente	58
Figura 5.3: Ilustração do Método da Leitura de Placa. Fonte: FHWA, 1998.	63
Figura 5.4: Ilustração de um sistema de coleta de dados pelo Método do veículo instrumentado. Adaptado de FHWA, 1998.	64
Figura 5.5: Simulador utilizado no trabalho desenvolvido por Bella e D’Agostini (2010).....	65
Figura 5.6: Perfil de velocidade média e velocidade operacional.....	66
Figura 6.1: Mapa de localização da extensão da DF-250 em Estudo (<i>Google Map</i> , 2010)	69
Figura 6.2: Croqui dos 25 trechos selecionados para a pesquisa e cada trecho com dois sentidos (sentido 1 e 2)	71
Figura 6.3: Exemplo da demarcação dos pontos de início e fim de cada trecho.	72
Figura 6.4: Valores da velocidade média e velocidade operacional em cada trecho	78
Figura 6.5: Sensor eletrônico	83
Figura 6.6: Ligação dos sensores com o equipamento.....	83
Figura 6.7: Conexão do equipamento ao computador e visualização do controle.....	84
Figura 6.8: Condição para elaboração do perfil de velocidade (Ponto zero para o motorista 1 = Ponto zero para o motorista 2 = Ponto zero para o motorista 3).....	86
Figura 6.9: Situação observada na presente pesquisa (Ponto zero para o motorista 1 $\neq$ Ponto zero para o motorista 2 $\neq$ Ponto zero para o motorista 3).	86
Figura 6.10: Comparação entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto para os trechos do estudo	88
Figura 7.1: Gráfico de Dispersão Linear da V_{85} em função da Sinuosidade em Planta.....	90
Figura 7.2: Gráfico de Resíduos para o Modelo 7	96
Figura 7.3: Gráfico de Resíduos do Modelo 6	102

Figura 7.4: Gráfico de Resíduos do Modelo 7	102
Figura 7.5: Diferença absoluta entre os valores estimados e observados da ₈₅	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WHO: *World Health Organization*

IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

PIB: Produto Interno Bruto

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DER: Departamento de Estradas de Rodagem

V₈₅: Velocidade correspondente ao 85º percentil da distribuição de velocidades

V_p: Velocidade projeto

DER/SP: Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo

DER/DF: Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AASHO: *American Association of State Highway Officials*

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

FHWA: *Federal Highway Administration*

IHSDM: *Interactive Highway Safety Design Model*

DCM: *Design Consistency Module*

ITE: *Institute of Transportation Engineers*

TRB: *Transportation Research Board*

DENATRAN: Departamento Nacional de Trânsito

CTB: Código Brasileiro de Trânsito

MUTCD: *Manual on Uniform Traffic Control Devices*

AARB: *Australian Road Research Board*

LABTTRAF: Laboratório de Transporte e Tráfego do Programa de Pós Graduação em Transportes da Universidade de Brasília – UnB

CONTRAN: Conselho Nacional de Trânsito

ITE: *Institute of Transportation Engineers*

CNT: Confederação Nacional de Transportes

1. CAPÍTULO

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Mais de 1,2 milhões de pessoas morrem todos os anos nas estradas de todo o mundo, e entre 20 e 50 milhões sofrem traumatismos não fatais (WHO, 2009). Essa elevada mortalidade vem sendo considerada pela Organização Mundial da Saúde como um problema de saúde pública (WHO, 2004).

Em 2008, houve em torno de 36 mil mortes em decorrência de acidentes viários no Brasil (Ministério da Saúde, 2010). Estes acidentes têm gerado diversos custos sociais, ambientais e financeiros ao país, como: pensões por invalidez; pessoas abaladas psicologicamente; leitos hospitalares ocupados por acidentados; indenizações; gastos materiais com mobiliário urbano e veículos avariados; reabilitação; perda de produção; entre outros. O IPEA (2006) calculou que no ano de 2004 o custo anual dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras alcançou a cifra de R\$ 22 bilhões, a preços de dezembro de 2005 – 1,2% do PIB brasileiro. A maior parte refere-se à perda de produção, associada à morte das pessoas ou interrupção de suas atividades, seguido dos custos de cuidados em saúde e os associados aos veículos.

Estudos mostram que a maioria dos acidentes com vítimas fatais ocorre em vias de pista simples. No Brasil, como em quase todo o mundo, a malha rodoviária é composta em sua grande maioria por rodovias de pista simples, conforme caracterizado na Figura 1.1 a partir dos últimos dados do Plano Nacional de Viação (DNIT, 2011).

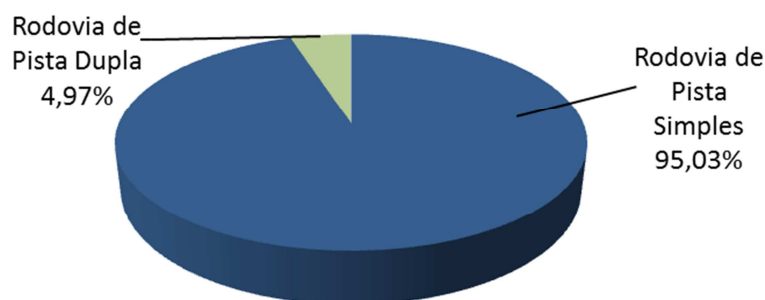


Figura 1.1: Distribuição da malha rodoviária federal no Brasil. Fonte: DNIT, 2011.

Segundo o IPEA (2008), os acidentes de trânsito, quase sempre resultam de causas multifatoriais que incluem, entre outros:

- condições meteorológicas desfavoráveis (por exemplo, chuva);
- comportamento inadequado por parte de condutores de veículos (por exemplo, excesso de velocidade);
- condições inadequadas da engenharia de tráfego (por exemplo, falta de passarelas, curvas com superelevação negativa ou insuficiente, fluxos veiculares de sentido duplo);
- condições inadequadas da frota de veículos (por exemplo, pneus carecas); e
- desenvolvimento urbano descontrolado das áreas no entorno da rodovia - travessias urbanas;

Apesar dessa realidade de causas multifatoriais, os relatórios policiais sobre acidentes normalmente registram um único fator contribuinte principal para cada acidente (IPEA, 2008). E a velocidade é apresentada como um dos principais elementos na ocorrência e na gravidade desses acidentes viários. Dirigir com velocidade superior ao limite legal, ou com velocidade incompatível com as condições do local, contribui tanto para a ocorrência de acidentes como para o aumento da gravidade dessas ocorrências (Malyshkina e Mannering, 2008).

A obediência dos condutores ao limite de velocidade está relacionada à sua percepção de razoabilidade do limite de velocidade. Em rodovias novas, a velocidade limite é, em geral, definida com base na velocidade de projeto. Já no caso de rodovias existentes, os estudos de engenharia realizados para a definição da velocidade limite baseiam-se, sobretudo, na velocidade operacional. Neste contexto, entende-se como velocidade operacional a velocidade praticada pelos veículos em regime de fluxo livre (considera que o motorista

não tem sua velocidade afetada pelos demais veículos da via), representada pelo 85º percentil da velocidade desses veículos. Esta velocidade é afetada principalmente pelas condições de geometria do local (definidas pelo seu projeto) e das suas áreas lindeiras (características físicas, uso e ocupação do solo nas laterais da via). A velocidade limite é definida para trechos viários que, em geral, são formados por uma sequência de elementos (curvas e tangentes em planta e perfil) cujas características são definidas a partir de uma velocidade diretriz. Ou seja, a definição da velocidade limite (para rodovias novas ou em operação) está associada direta ou indiretamente à velocidade considerada na definição das características geométricas da via (velocidade de projeto). A velocidade de projeto está, em qualquer dos casos (rodovias novas ou em operação) associada à velocidade limite.

Um limite de velocidade não razoável pode aumentar a diferença de velocidade regulamentada e a velocidade praticada pelos condutores, e os condutores podem acreditar que exceder os limites de velocidade não constitui um aumento do risco de acidentes e de ferimentos para eles e para os demais. Assim, tendo em vista a importância da velocidade operacional para a definição da velocidade regulamentar (limite) para a via e seus reflexos sobre a segurança dos usuários, é importante identificar como as características gerais da geometria viária afetam a velocidade operacional e também sua relevância nos aspectos de segurança e operação, torna-se necessário o conhecimento das relações entre velocidade de projeto e velocidade operacional. Esta identificação contribui para o estabelecimento de velocidades limites mais realistas e que possam assim ser mais naturalmente obedecidas pelos usuários e com isso reduzir o número e a severidade dos acidentes em rodovias causados pelo fator velocidade. Para tanto, a análise deve levar em conta as características geométricas (alinhamento horizontal e vertical) e ambientais de trechos viários constituídos por diferentes segmentos homogêneos que compõem uma rodovia. Neste estudo, um segmento viário é considerado homogêneo se possui ao longo de sua extensão geometria constante (por exemplo, curva horizontal em terreno plano) características similares de geometria e ambiente viário, por exemplo, em área sem ocupação lindeira.

Complementarmente, também é importante investigar as características gerais da distribuição da velocidade praticada pelos motoristas em regime de fluxo livre com relação à velocidade de projeto da via, para determinadas características globais dos trechos viários.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho buscará responder a seguinte questão: qual a efetiva relação entre a velocidade de projeto usada pelos projetistas de rodovias rurais de pista simples e a velocidade operacional praticada em trechos viários dessas vias, formados por dois ou mais segmentos homogêneos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Estudos mostram que a velocidade operacional dos veículos em rodovias rurais de pista simples é, em geral, superior a velocidade de projeto correspondente. Difere, também, da velocidade limite estabelecida para a via, embora estudos da velocidade operacional em tangente mostrem que a velocidade limite exerce uma influência sobre a velocidade operacional nesses segmentos.

Uma limitação do conceito da velocidade de projeto é descrita por Krammes e Glascock *apud* Fitzpatrick *et al.* (2000a), onde a velocidade de projeto é aplicada somente nas curvas horizontais e verticais, e não na tangente que as conectam. Se a tangente é longa o suficiente, os motoristas podem desenvolver velocidades mais altas que a velocidade praticada na curva. Essas críticas residem justamente na diferença observada na prática entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto. A norma brasileira adota critérios bastante semelhantes. Não existe estudo nacional que faça a análise dessa diferença em rodovias brasileiras. Teoricamente, a velocidade de projeto, ao definir as condições de projeto, deveria ser sempre maior ou igual às velocidades limite e operacional. Se inferior (que é o que ocorre de acordo com os estudos realizados no exterior), essa diferença deveria ser justificada apenas pelo uso de coeficientes de atrito conservadores (longitudinal e transversal) e, em consequência, por características geométricas (sobretudo de curvas horizontais e verticais), superiores à efetivamente necessária em campo (sobretudo porque estes coeficientes consideram pavimento molhado). Cabe assim, uma avaliação da diferença efetiva entre as velocidades operacionais e de projeto, de modo a subsidiar procedimentos posteriores voltadas à definição de velocidades limites que sejam naturalmente obedecidas pelos usuários.

1.4 HIPÓTESE

A velocidade operacional dos veículos nas rodovias brasileiras de pista simples é superior a velocidade de projeto destas rodovias, e a relação entre elas em um dado trecho viário depende das características específicas dos elementos que o compõem (segmentos homogêneos) e da forma como estes elementos estão combinados no trecho.

1.5 OBJETIVOS

Objetivo geral: Estudar a velocidade operacional em trechos viários com base nas suas características geométricas, expressas em índices que refletem as condições gerais do alinhamento horizontal e vertical do trecho.

Objetivos específicos:

- a) Desenvolver modelo de previsão da velocidade operacional, considerando as variáveis que refletem as características geométricas de cada trecho; e
- b) Fazer uma análise crítica da velocidade operacional com relação à velocidade de projeto em cada trecho formado por um ou mais segmentos homogêneos.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Estudo da velocidade operacional dos veículos em trechos viários de rodovias de pista simples, assim como todas as referências teóricas necessárias para esta dissertação e o respectivo estudo de caso, tem sua apresentação estruturada conforme os capítulos abaixo relacionados.

A apresentação do tema da dissertação, abrangendo a hipótese levantada, formulação do problema, bem como os principais objetivos e justificativas para o desenvolvimento do referido trabalho, encontram-se no Capítulo 1.

O Capítulo 2 contempla aspectos conceituais sobre velocidade de projeto, definições adotadas em normas de outros países e no Brasil, critérios utilizados no Brasil e no exterior

para a seleção de valores de velocidade de projeto. Os principais elementos geométricos determinados pela velocidade de projeto, também foram incluídos no referido capítulo.

No Capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica a respeito dos aspectos gerais e conceituais sobre velocidade operacional, apresentando suas principais aplicações.

O Capítulo 4 apresenta modelos de previsão da velocidade operacional. Assim, baseando-se nos modelos de previsão de velocidade operacional, faz-se uma breve explanação de alguns modelos e dos principais elementos interveniente na velocidade operacional. Apresenta-se, ainda, índices de alinhamento utilizados em modelos de previsão da velocidade operacional.

No Capítulo 5 é apresentado o método para o estudo da velocidade operacional em trechos de rodovias de pista simples, e no Capítulo 6 é descrita uma aplicação desse método.

No Capítulo 7 são apresentados e analisados os resultados obtidos no Capítulo 6.

Finalizando, no Capítulo 8, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, fazendo um comparativo entre os resultados alcançados e os objetivos estabelecidos. Neste capítulo são, também, sugeridas algumas recomendações para trabalhos futuros.

2. CAPÍTULO

VELOCIDADE DE PROJETO

2.1 ASPECTOS CONCEITUAIS

A velocidade de projeto ou diretriz é um elemento fundamental para o projeto de rodovias, especialmente levando em conta sua influência sobre uma série de parâmetros a serem adotados para as vias (DER/SP, 2006). A velocidade de projeto é também usada por alguns órgãos rodoviários, especialmente na abertura da via ao tráfego, como velocidade limite.

A definição de velocidade de projeto evoluiu desde a década de 1930, quando Barnett, em 1936, definiu como a máxima velocidade, razoavelmente uniforme, que pode ser adotada por um grupo de condutores operando seus veículos, em áreas não urbanas (Fitzpatrick *et al.*, 2003).

2.1.1 Definições adotadas em normas de outros países

O primeiro manual de normas americana abordando aspectos específicos de projetos geométricos de rodovias foi publicado pela *American Association of State Highway Officials – AASHO em 1940* (Fitzpatrick *et al.*, 2003). Depois desse manual, outras versões foram sendo atualizadas e complementadas nos anos de 1954, 1965 e 1971; desde então vem também sendo revisado e complementado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO*, com as publicações de 1984, 1990, 1994, 2001 e a mais nova versão de 2004. As alterações da definição de velocidade de projeto nas referidas normas americanas são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Definições de velocidade de projeto da AASHO/AASHTO

Autor	Ano	Definição de velocidade de projeto
<i>A Policy on Highway Types (Geometric)</i> AASHO	1940	A velocidade de projeto adotada para uma rodovia é considerada a máxima velocidade, aproximadamente uniforme, que provavelmente será adotada pelo grupo de condutores mais rápidos, mas não necessariamente pela pequena porcentagem de condutores irresponsáveis. A velocidade de projeto adotada para uma rodovia é determinada considerando a topografia da região percorrida, justificativa econômica baseada no volume de tráfego, custo do direito de passagem, e outros fatores pertinentes, tais como considerações estáticas.
<i>A Policy on Geometric Design of Rural Highways.</i> AASHO	1954 e 1965	Velocidade de projeto é a velocidade determinada para o projeto e está relacionada com características físicas da rodovia que influenciam a operação do veículo. É a máxima velocidade segura que pode ser mantida ao longo de determinada seção da via, quando as condições são tão favoráveis que as características de projeto da rodovia governam.
<i>AASHTO, Green Book</i>	1984, 1990 e 1994	Velocidade de projeto é a máxima velocidade segura que pode ser mantida ao longo de um determinado segmento viário, quando as condições são tão favoráveis que as características de projeto da rodovia governam. A velocidade de projeto adotada segundo tal definição deve ser coerente com a topografia, o uso do solo e a classificação funcional da rodovia
<i>AASHTO, Green Book</i>	2001 e 2004	Velocidade de projeto é a velocidade selecionada e utilizada para determinar várias características geométricas da via.

Fonte: adaptado de Fitzpatrick *et al.*, 2003.

A definição de velocidade de projeto apresentada no manual da *AASHTO* de 1994, assumia implicitamente certa condição de uniformidade na operação da via, em que a maioria dos veículos da corrente de tráfego não iria exceder a máxima velocidade segura (DER/SP, 2006).

A publicação de 2001 da *AASHTO* apresentou um novo conceito de velocidade de projeto, desvinculado da máxima velocidade segura que pode ser mantida ao longo de certo trecho da via. O termo “seguro” foi retirado para evitar conclusões de que velocidades superiores

à velocidade de projeto seriam “inseguras”(Fitzpatrick *et al.*, 2003). O novo conceito ratificou a relação entre a velocidade de projeto e os parâmetros de projeto adotados. Isto é, definida a velocidade de projeto, vários parâmetros serão definidos em relação a esta e, em decorrência, os elementos geométricos da via aos quais os diferentes parâmetros estão associados. Este conceito continua sendo adotado com a mesma definição na mais nova publicação do *Green Book* (2004) da AASHTO.

2.1.2 Definição adotada na Norma Brasileira

O DNER (1999), na publicação Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais, define velocidade de projeto ou diretriz, como sendo a velocidade selecionada para fins de projeto da via e que condiciona as principais características da mesma, tais como: curvatura, superelevação e distância de visibilidade, das quais depende a operação segura e confortável dos veículos. A velocidade de projeto ou diretriz representa a maior velocidade a ser atingida por um veículo padrão, em um trecho viário, mantendo-se as condições de segurança dentro de valores pré-estabelecidos no projeto.

A velocidade de projeto representa a maior velocidade com que pode ser percorrido um trecho rodoviário cuja superfície de rolamento apresenta características normais de rugosidade e ondulações, com segurança e em condições aceitáveis de conforto, mesmo com o pavimento molhado, quando o veículo estiver submetido (DER/SP, 2006).

2.2 CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DA VELOCIDADE DE PROJETO

É desejável que a velocidade de projeto seja uniforme ao longo de extensos segmentos. No caso de redução em determinados trechos deverá haver transição adequada permitindo redução gradual da velocidade (AASHTO, 2004).

Para o DNIT (2010), no projeto geométrico de uma rodovia, é desejável admitir uma velocidade de projeto constante. Entretanto, mudanças na topografia e outras condições podem tornar necessária uma mudança dessa velocidade em certas seções, dentro dos limites do projeto e nos seus pontos terminais. A variação de velocidade ao longo de uma rodovia tem um impacto direto na segurança.

2.2.1 Critérios adotados no exterior para a seleção de valores de velocidade de projeto

O *Green Book* americano (AASHTO, 2004), recomenda que a velocidade de projeto seja determinada em função da característica do terreno, tipo e volume de tráfego, considerações econômicas, fatores ambientais, classificação funcional da via e se a via é urbana ou rural (ver Tabela 2.2). Além desses critérios, a AASHTO (2004) considera que a velocidade de projeto deve ser consistente com a velocidade esperada pelo condutor. Os condutores de veículos ajustam suas velocidades com base em sua percepção das limitações físicas da via e do tráfego.

Tabela 2.2: Velocidade de Projeto

Tipo de Rodovia	Classificação Funcional	Relevo da Região	Velocidade de Projeto, km/h (mph)		
			Tráfego Médio Diário		
			< 1500	1500-3000	>3000
Pista simples	Rural	Arterial Principal	Plano	100-120 (60-75)	
			Ondulado	90-110 (55-70)	
			Montanhoso	60-100 (40-60)	80-100 (50-60)
		Arterial Secundária	Plano	100-110 (60-70)	
			Ondulado	80-110 (50-70)	
			Montanhoso	60-100 (40-60)	80-100 (50-60)
	Urbanas de Alta Velocidade	Coletor	Plano	80-100 (50-60)	100 (60)
			Ondulado	60-100 (40-60)	80-100 (50-60)
			Montanhoso	50-100 (30-60)	60-100 (40-60)
		Arterial	Todos 70-100 (45-60)		
“Freeway”	Rural	Arterial	Plano	110-120 (70-75)	
			Ondulado	110 (70)	
			Montanhoso	80-110 (50-70)	
	Urbano	Arterial	Todos	80-110 (50-70)	
Pista com várias faixas	Rural	Arterial	Plano	100-120 (60-75)	
			Ondulado	100-110 (60-70)	
			Montanhoso	80-110 (50-70)	

Urbanas de Alta Velocidade	Arterial	Todos	70-110 (45-70)
Urbanas de Baixa Velocidade	Arterial	Todos	50-60 (30-40)

2.2.2 Critérios adotados no Brasil para a seleção de valores de velocidade de projeto

No Brasil, a velocidade diretriz é função da classe de projeto, que reflete sua função no sistema viário, e os tipos de relevos predominantes nas regiões a serem atravessadas pela rodovia (ver Tabela 2.3). A velocidade de projeto pode variar entre o limite máximo de 120 km/h (Classe 0 ou especial em região plana) e mínimo de 30 km/h (Classe IV em região montanhosa). Em situações excepcionais, de relevo extremamente favorável, pode-se adotar velocidades de projeto de até 130 km/h (DER/SP, 2005).

Tabela 2.3: Velocidade de projeto ou diretriz (km/h)

Classe do Projeto	Sistema	Classes Funcionais	Velocidade de Projeto		
			Relevo		
			Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	Arterial	Principal Primário Secundário	120	100	80
Classe I	Arterial	Principal Primário Secundário	100	80	60
Classe II	Arterial	Principal Primário Secundário	100	70	50
	Coletor	Primário Secundário			
Classe III	Coletor	Primário Secundário	80	60	40
	Local	Local			
Classe IV	Coletor	Primário Secundário	80-60	60-40	40-30
	Local	Local			

Fonte: Adaptado de DNER, 1999.

Além dos fatores mencionados, a velocidade de projeto a ser adotada para uma via está associada ao custo de implantação da mesma. Velocidades de projeto elevadas requerem características geométricas superiores, que por sua vez, elevam o custo da construção da

rodovia. Este é um dos motivos pelos quais as velocidades de projeto nem sempre podem ser elevadas, como seria desejável sob o ponto de vista da fluidez do tráfego. Questões ligadas à promoção da segurança para todos os futuros usuários da via também devem ser levadas em conta na definição da velocidade de projeto.

2.3 PRINCIPAIS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DETERMINADOS PELA VELOCIDADE DE PROJETO

A velocidade de projeto é parâmetro fundamental para determinação dos principais elementos do projeto geométrico de rodovias.

Segundo Fitzpatrick *et al.* (2003) a relação entre velocidade de projeto e os elementos da via pode ser classificada em três casos distintos:

- **Caso 1 (Relação Direta):** ocorre quando o elemento/componente é determinado em função da velocidade de projeto.
- **Caso 2 (Relação Indireta):** essa relação acontece quando para determinar o elemento/componente da via não se faz uso da velocidade de projeto, e sim da velocidade operacional da via, e essa por sua vez está de alguma forma relacionada com a velocidade de projeto.
- **Caso 3 (Não há relação):** alguns elementos/componentes não possuem nenhum tipo de relação com a velocidade de projeto. Isso acontece quando para determinar o elemento/componente a velocidade de projeto não é necessária e nem a velocidade operacional da via, e estes são determinados através de outros métodos.

Fitzpatrick *et al.* (2003) indicam, de forma resumida na Tabela 2.4, o tipo de relação entre a velocidade de projeto e os elementos/componentes das vias, com base no *Green Book* da AASHTO de 2001.

Tabela 2.4: Relação entre velocidade de projeto e elementos de projeto

ELEMENTOS DO PROJETO	RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE PROJETO E ELEMENTOS DE PROJETO		
	Direta	Indireta	Outros Métodos
DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE			
Distância de Visibilidade da Parada	✓		
Distância de Visibilidade para Tomada de Decisão	✓		
Distância de Visibilidade de Ultrapassagem	✓	✓	
Distância de Visibilidade em Interseções	✓		
ALINHAMENTO HORIZONTAL			
Raio mínimo	✓		
Superelevação máxima	✓		
ALINHAMENTO VERTICAL			
Greide Vertical		✓	
Curvas Verticais	✓		
SEÇÃO TRANSVERSAL			
Inclinação Transversal			✓
Largura da faixa			✓
Sarjeta e Meio Fio	✓		

Fonte: Fitzpatrick *et al.*, 2003.

A seguir serão explanados os principais elementos de projeto referidos por Fitzpatrick *et al.* (2003) que têm relação direta com a velocidade de projeto, segundo a norma Brasileira (DNER, 1999).

2.3.1 Distância de visibilidade

As distâncias de visibilidade traduzem os padrões de visibilidade a serem proporcionadas ao motorista, de tal forma que ele possa captar informações sobre a via, interpretá-las e tomar decisões necessárias a tempo e com segurança (DNER, 1999).

Distância de visibilidades adequadas são elementos essenciais para a operação segura e eficiente do tráfego em conformidade com o padrão estabelecido para determinada via. Em

geral, são consideradas três distâncias de visibilidade básicas para o projeto de geometria de rodovias:

- (i) Distância de Visibilidade de Parada (DVP);
- (ii) Distância de Visibilidade para Tomada de Decisão (DVTD); e
- (iii) Distância de Visibilidade de Ultrapassagem (DVU).

Distância de visibilidade de parada (DVP)

É definida como a distância mínima necessária para que um veículo que percorre uma estrada possa parar antes de atingir um obstáculo na sua trajetória (Filho, 1998). É um elemento importante para o dimensionamento das curvas do alinhamento vertical e deve ser adotada em função da velocidade de projeto da via (DER/SP, 2005).

O Manual do DNER (1999) distingue dois grupos distintos de valores mínimos para as distâncias de visibilidade de parada, um obtido com base nas velocidades de projeto, denominado distância de visibilidade desejável e outro considerando valores de velocidades médias, denominado distância de visibilidade mínima. A Tabela 2.5 mostra os valores calculados para a distância de visibilidade de parada, segundo a AASHTO (2004) e o DNER (1999).

Tabela 2.5: Distância de Visibilidade de Parada

VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)	DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE DE PARADA (m)		
	AASHTO	DNER	
		Distância Mínima	Distância Desejada
30	35	30	30
40	50	45	45
50	65	60	65
60	85	75	85
70	105	90	110
80	130	110	140
90	160	130	175
100	185	155	210
110	220	180	255
120	250	205	310
130	285	-	-

Fontes: AASHTO, (2004) e DNER, (1999).

Na Tabela 2.6 estão discriminados, para cada velocidade diretriz, os respectivos valores de velocidade média.

Tabela 2.6: Velocidade média (para dias de chuva) em função da velocidade de projeto

Velocidade de Projeto (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Velocidade média (Km/h)	30	38	46	54	62	71	79	86	92	98

Fontes: DNER, 1999.

Distância de visibilidade para tomada de decisão (DVTD)

A distância de visibilidade para tomada de decisão é a distância necessária para que o motorista tome consciência de uma situação de potencial risco ou inesperada, tendo tempo suficiente para avaliar o problema encontrado, selecionar o caminho a percorrer e a velocidade a empregar e executar assim a manobra necessária com segurança.

A distância de visibilidade para tomada de decisão é função direta da velocidade de projeto. A Tabela 2.7, retirada do Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999) elaborada com base no Manual da AASHTO (1994), apresenta os valores calculados para os dois tipos de manobras em função direta da velocidade de projeto.

Tabela 2.7: Distância de Visibilidade para Tomada de Decisão (m)

Velocidade de Projeto (km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Simple Parada	50	75	95	125	155	185	225	265	305
Desvios de Obstáculos	115	145	175	200	230	275	315	375	375

Fonte: DNER, 1999.

Distância de visibilidade de Ultrapassagem (DVU)

A distância de visibilidade de ultrapassagem é a distância que permite ao veículo que trafega em maior velocidade visualizar, na faixa de tráfego oposta, um trecho da via com espaço suficiente para ultrapassar com segurança veículos mais lentos, sem interferir na velocidade dos veículos da faixa do fluxo oposto. Assim, além de assegurar extensão suficiente para que as manobras de ultrapassagem sejam seguras, os valores fixados para a distancia de visibilidade de ultrapassagem visam à eficiência da operação (DER/SP, 2005).

A velocidade de projeto é utilizada como parâmetro de referência no critério geométrico para determinação de valores mínimos para a DVU.

O Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999) estabelece valores mínimos de projeto recomendados para a DVU. A Tabela 2.8 apresenta tais valores de projeto.

Tabela 2.8: Valores de Projeto Estabelecidos pelo DNER para as Distâncias de Visibilidade de Ultrapassagem.

Velocidade Diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Dist. Visibilidade de Ultrapassagem (em metros)	180	270	350	420	490	560	620	680	730	800

Fonte: DNER, 1999.

2.3.2 Elementos do alinhamento horizontal

O alinhamento horizontal consiste em trechos em tangentes ligados por curvas circulares com ou sem a associação de curvas de transição. Os trechos em tangentes são facilmente projetados, mas não é recomendado ter-se longos trechos retos, pois isso propícia que os motoristas adotem velocidades elevadas, contribuindo para ocorrência de acidentes. Além disso, o encontro de curvas circulares, continuamente, faz com que o motorista tenha atenção e tira a monotonia da viagem. Contudo, o estabelecimento de curvatura adequada com relação à velocidade de projeto, bem como com relação à superelevação, é de fundamental importância no projeto de curvas horizontais, para garantir a segurança e o conforto dos usuários da via.

Raio mínimo

O raio mínimo de curvatura horizontal é o menor raio da curva circular que pode ser percorrido com a velocidade diretriz e à taxa máxima de superelevação, em condições aceitáveis de segurança e conforto (DNER, 1999). O raio mínimo é determinado em função da velocidade de projeto, da superelevação máxima e do coeficiente de atrito transversal.

O DNER (1999) fixa, como valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito transversal ($f_{máx}$), para fins de projeto, os valores apresentados na Tabela 2.9, para

diferentes velocidades de projeto. Os valores máximos de superelevação ($e_{m\acute{a}x}$), e raio mínimo do trecho circular são apresentados na Tabela 2.10.

Tabela 2.9: Valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito transversal ($f_{m\acute{a}x}$).

Velocidade de Projeto (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$f_{m\acute{a}x}$	0,2	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11

Fonte: DNER,1999.

Tabela 2.10: Valores dos raios mínimos em função das taxas máximas de superelevação (em metros).

Velocidade diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$e_{m\acute{a}x}$										
4	30	60	100	150	205	280	355	465	595	755
6	25	55	90	135	185	250	320	415	530	665
8	25	50	80	125	170	230	290	375	475	595
10	25	45	75	115	155	210	265	345	435	540
12	20	45	70	105	145	195	245	315	400	490

Fonte: DNER,1999.

Superelevação Máxima (SE)

A superelevação   medida pela inclinação transversal da pista em relação ao plano horizontal, sendo expressa em proporção (m/m) ou em percentagem (%) (Lee, 2008).

A superelevação consiste em elevar a declividade transversal dos trechos da pista em curva. Ela reduz a ação lateral da fôrça centrípeta nos passageiros e cargas. Esta técnica também evita que água se acumule no asfalto, evitando assim o efeito de aquaplanagem. A definição do seu valor máximo tem relação com a velocidade de projeto (ver Tabela 2.10).

2.3.3 Elementos do alinhamento vertical

Rampas

Rampa é a declividade longitudinal da pista. Seu valor geralmente é dado pela tangente do ângulo com o plano horizontal, expressa em porcentagem.

As declividades máximas recomendadas pelo DNIT (DNER, 1999) dependem da classe de projeto da rodovia e do relevo. A essas características, conforme mostrado na Tabela 2.3, estão associadas velocidades de projetos específicas. A Tabela 2.11, a seguir, resume os valores máximos recomendados para as rampas das diferentes classes de rodovias e relevo.

Tabela 2.11: Declividades Máximas para Rodovias Rurais.

Classe de Projeto	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	3%	4%	5%
Classe I	3%	4,5%	6%
Classe II	3%	5%	7%
Classe III	4%	6%	8%
Classe IV – A	4%	6%	8%
Classe IV – B	6%	8%	10% (*)

Nota: *A extensão de rampas acima de 8% será desejavelmente limitada a 300 m contínuos

Fonte: DNER, 1999.

Curvas Verticais

As curvas do alinhamento vertical devem apresentar características que proporcionem condições de visibilidade adequadas ao longo de todo o seu desenvolvimento. Para a determinação do comprimento mínimo das curvas verticais são empregados usualmente três critérios, que são: distância de visibilidade, aparência satisfatória ou mínimo valor absoluto e condição de conforto ou máxima aceleração centrífuga admissível.

A distância de visibilidade é parâmetro condicionante para a fixação do comprimento mínimo das curvas verticais, especialmente a distância de visibilidade de parada (DER/SP, 2006). Essa distância constitui, portanto, no principal fator de dimensionamento das curvas do alinhamento vertical e deve ser adotada em função da velocidade de projeto da via.

2.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS

A seleção da velocidade de projeto para uma via implica na determinação das principais características do projeto da rodovia em planta e perfil, além de definir os elementos da seção transversal da pista.

Por essa razão, em diversos países, como é o caso do Brasil, considera-se a velocidade de projeto como a velocidade máxima com que a via pode ser percorrida com segurança nas condições em que a circulação está somente condicionada pelos elementos de projeto.

Esta relação direta explícita entre velocidade de projeto e velocidade máxima de segurança foi eliminada das versões da norma americana de 2001 e 2004.

É importante destacar que embora a velocidade diretriz seja válida para o projeto como um todo (seja ele da via completa ou de um trecho), ela afeta mais diretamente as características da via nos trechos em curva (horizontal e vertical). Além disso, os coeficientes de atrito transversal (usado no cálculo da superelevação) e longitudinal (usado para a determinação da distância de visibilidade de parada) são determinados para condições específicas de revestimento (molhado, mas não lamacento) e dos pneus (em boas condições, porém não novos).

A norma não refere coeficientes diferenciados para diferentes tipos de pavimento asfáltico (CBUQ, tratamento superficial simples, tratamento superficial duplo, etc.) e/ou diferentes tipos de agregados que podem ser usados na construção do pavimento.

Por essa razão, é importante avaliar para cada situação, qual a velocidade máxima de segurança correspondente a uma dada velocidade de projeto. Esta velocidade, refletida pela V_{85} dos veículos trafegando em condição de fluxo livre, é denominado no contexto do presente trabalho como velocidade operacional.

3. CAPÍTULO

VELOCIDADE OPERACIONAL

3.1 ASPECTOS CONCEITUAIS

De acordo com Fitzpatrick *et al.* (2003), o termo velocidade operacional é geralmente usado para descrever a real velocidade de um grupo de veículos ao longo de um determinado segmento da via.

A AASHTO (1994), em sua publicação *A Policy on Geometric Design of Highway and Streets*, definiu velocidade operacional como a mais alta velocidade de percurso que o veículo pode alcançar em uma dada via sob condições favoráveis de tempo e nas condições predominantes de tráfego, sem exceder em qualquer instante a velocidade utilizada no projeto geométrico (AASHTO, 1994). Em 2004, a AASHTO revisou essa definição na nova edição do *Green Book*, e definiu a velocidade operacional como a velocidade com que motoristas são observados conduzindo seus veículos em condições de fluxo livre (considera que o motorista não tem sua velocidade afetada pelos demais veículos da via). Esta última definição é adotada também pelo Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, e será considerada na presente pesquisa.

A velocidade operacional é geralmente representada pelo 85º percentil da velocidade dos veículos que apresentam *headways* iguais ou superiores a 5 segundos com relação ao veículo da frente e *headways* superiores a 3s com relação ao veículo de trás. Neste trabalho, *Headway* é o tempo, medido em segundos, entre a passagem dos pára-choques dianteiros de dois veículos consecutivos na corrente de tráfego. A Figura 3.1 apresenta ilustração do termo *headway*. O *headway*, efetivamente, pode ser medido com relação a outros pontos comuns de referência, observados nos dois veículos consecutivos (por exemplo, o pára-choque traseiro).

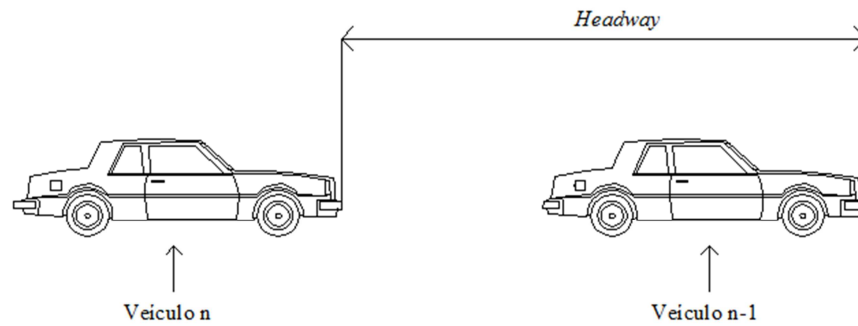


Figura 3.1: Ilustração do termo “headway”

É importante destacar que a seleção do 85º percentil como valor a ser considerado tem explicação em termos de segurança. Segundo ITE (1993), diversos estudos demonstraram que motoristas que dirigem a uma velocidade superior ao 85º percentil têm maior envolvimento em acidentes comparados aos motoristas que conduzem seus veículos com velocidades próximas deste valor.

O 85º percentil ou V_{85} pode ser obtido a partir da análise estatística dos dados de velocidade. A Figura 3.2 apresenta a curva de distribuição de frequência acumulada das velocidades, onde o percentil 85 é adotado como velocidade operacional (DER/SP, 2006; AASHTO, 2004).

A curva de distribuição de frequência acumulada das velocidades em determinada seção da estrada define, para cada velocidade, a percentagem de veículos (percentil) que circulam a uma velocidade igual ou inferior à mesma (ver Figura 3.2).

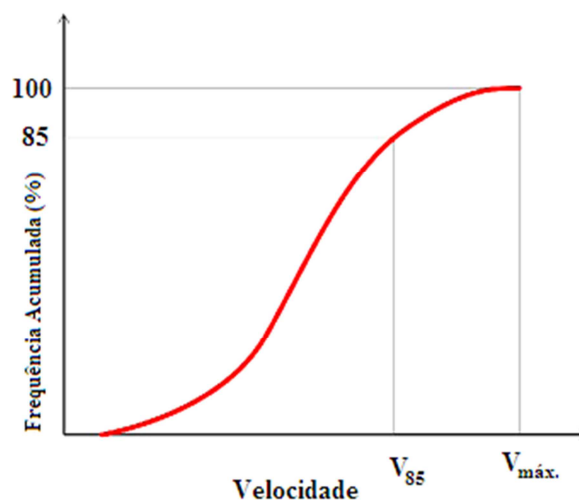


Figura 3.2: Curva de Distribuição de Frequência Acumulada de Velocidades com Indicação da Velocidade Operacional (V_{85}). Fonte: DER/SP, 2006.

Para o DER/SP (2006), quando se analisa um trecho viário já existente, a velocidade operacional pode ser determinada através de medições realizadas no local; para tanto, existem diversos equipamentos ou procedimentos adequados. Em casos em que os projetos geométricos ainda não estão implantados, ou estão sendo alterados seus traçados, a determinação da velocidade operacional passa a exigir a utilização de modelos de previsão de velocidades. Esses serão abordados no Capítulo 4.

3.2 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA VELOCIDADE OPERACIONAL

A velocidade operacional é o principal fator considerado na maioria dos estudos no âmbito da definição da velocidade limite, diversas pesquisas mostram que se a velocidade limite for inferior à velocidade desejada pelo motorista, ela passa a não ser respeitada e, portanto, não tem efeito prático.

Outra importante aplicação da velocidade operacional tem sido proposta e implementada em vários países quando se trata de analisar a consistência geométrica de projetos geométricos.

3.2.1 Análise de Consistência Geométrica

A consistência geométrica é um método de análise aplicado a rodovias de pista simples, e tem como principal objetivo verificar se as principais características da via estão dispostas de forma harmônica e equilibrada, de modo a oferecer ao condutor uma percepção razoável de segurança e conforto compatível com a expectativa no seu dimensionamento (Garcia, 2008).

Vários são os métodos que utilizam a velocidade operacional na análise de consistência geométrica. Essa velocidade é considerada pela maior parte dos pesquisadores como o elemento mais representativo do comportamento do condutor em determinadas condições geométricas da via. Através de um diagrama de perfil da velocidade operacional estimada, ao longo da via, é possível observar inconsistências como: (i) diferenças significativas entre a velocidade operacional e a de projeto – problemas no dimensionamento do projeto e (ii) a grande variação repentina de velocidade – problemas de operação.

A Suíça foi um dos primeiros países a utilizar o perfil de velocidades para avaliar a consistência geométrica de rodovias. A Alemanha e Austrália, baseado no método Suíço, também utilizam o perfil de velocidades para garantir a consistência do traçado.

Os principais métodos desenvolvidos para avaliar a consistência de traçado foram elaborados na Alemanha e Estados Unidos. Os métodos são os desenvolvidos por Leisch e Leisch (1977), *apud* Fitzpatrick (2000a); Lamm *et al.* (1988), *apud* FHWA (2000); Krammes *et al.* (1993), *apud* FHWA (2000); e Fitzpatrick *et al.* (2000a).

No método Suíço, há três condições que qualquer perfil de velocidade deve satisfazer para que o alinhamento horizontal possa ser considerado consistente:

- a diferença máxima de velocidade entre uma curva e uma tangente precedente ou curva com grande raio a montante é 5 km/h;
- a diferença máxima de velocidade em curvas sucessivas deve ser 10 km/h, e qualquer diferença de velocidade acima de 20 km/h deve ser evitada;
- a distância de visibilidade disponível não deve ser menor que o comprimento necessário para que a mudança de velocidades (entre curvas sucessivas) ocorra a uma taxa de $0,8 \text{ m/s}^2$.

Sempre que alguma dessas condições estabelecidas não for atendida em trechos de rodovias existentes, o segmento é considerado inconsistente, e se deve estudar o histórico de acidentes referente ao segmento (FHWA, 2000).

Método desenvolvido por Leisch e Leisch

Os estudos de Leisch e Leisch (1977), *apud* Fitzpatrick (2000a), foram concluídos na década de 70, onde o autor observou que existiam dois problemas relacionados à velocidade. O primeiro era a variação de velocidade operacional em vias em que a velocidade de projeto não ultrapassasse a 90km/h. O segundo problema foi a diferença encontrada entre velocidades operacionais entre veículos de passeios e caminhões.

Para resolver estes dois problemas, Leisch e Leisch (1977), *apud* FHWA (2000), modificaram a definição de velocidade de projeto para “potencial velocidade de operação

que é definida pela velocidade de projeto e correlação dos elementos físicos da via”. Eles sugeriram modificações no conceito de velocidade de projeto para incluir a “regra dos 15 km/h”, que segue os três princípios:

- reduções na velocidade de projeto devem ser evitadas mas, se forem necessárias, não devem exceder 15 km/h;
- velocidades de operação dos veículos de passeio não devem variar mais que 15 km/h;
- a diferença entre as velocidades de operação dos caminhões e veículos de passeio não deve ser maior que 15 km/h.

Para visualização das mudanças de velocidade, é necessário utilizar um perfil de velocidade que é criado traçando medições de velocidade *versus* distância. O perfil de velocidade é feito levando-se em consideração os alinhamentos horizontais e verticais das rodovias. Os perfis de velocidade de veículos de passeio e caminhões são elaborados separadamente e, logo, sobrepostos. Se os princípios da “regra dos 15 km/h” forem violados, o segmento do alinhamento é considerado inconsistente e deve ser modificado.

Método proposto por Lam *et al.*

Lamm *et al.* (1988), *apud* FHWA (2000), sugeriram um modelo após estudar 260 curvas no estado de Nova Iorque. O modelo foi desenvolvido para previsão de velocidade a partir dos alinhamentos horizontais e da taxa de mudança de curvatura como a principal variável para determinar velocidades operacionais. O perfil de velocidade é construído com a previsão de velocidade operacional, de maneira semelhante ao método suíço. O método proposto por Lamm *et al.* (1988), *apud* FHWA (2000), que também é conhecido como método dos critérios de segurança, define três categorias de classificação para a análise da consistência de projeto:

- Projeto bom: as mudanças entre as velocidades de operação e de projeto e as velocidades de operação entre elementos sucessivos do alinhamento são menores ou iguais a 10 km/h;

- Projeto razoável: as mudanças entre as velocidades de operação e de projeto e as velocidades de operação entre elementos sucessivos do alinhamento são maiores que 10 km/h e menores ou iguais a 20 km/h;
- Projeto fraco: as mudanças entre as velocidades de operação e de projeto e as velocidades de operação entre elementos sucessivos do alinhamento são maiores que 20 km/h.

Considera-se que um projeto bom é consistente e que os projetos razoáveis têm algumas inconsistências que podem afetar o comportamento do motorista. Os projetos ruins têm inconsistências que causam grandes diferenças de velocidade – maior que 20 km/h – no perfil de velocidade da estrada.

Lamm *et al.* (1990), *apud* Garcia, 2008), propuseram três critérios de segurança que serão explicados a seguir.

- (i) Critério de segurança I: a análise é feita na diferença entre a velocidade operacional estimada por modelos matemáticos e a velocidade de projeto. A classificação do projeto geométrico de um segmento de rodovia é feita conforme as três seguintes condições:
 - ✓ Caso 1 – Projeto bom: o módulo da diferença entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto não deve ser superior a 10 km/h. Segmentos de rodovia que se enquadram neste caso são considerados consistentes e não necessitam de correções. Este caso representa uma situação ideal entre o projeto e a utilização da via;
 - ✓ Caso 2 – Projeto regular: o módulo da diferença entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto deve ocorrer entre 10 km/h e 20 km/h. Segmentos de rodovias que se enquadram nesse caso devem sofrer adaptações a fim de restabelecer as condições de segurança;
 - ✓ Caso 3 – Projeto fraco: o módulo da diferença entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto é superior a 20 km/h. Segmentos de rodovias que se enquadram neste caso estão com sérios problemas de dimensionamento e devem ser reprojatados a fim de se restabelecer condições mínimas de segurança.

- (ii) Critério de segurança II: este critério visa analisar a consistência da velocidade operacional; ou seja, a análise é feita a partir da diferença entre as velocidades operacionais de elementos planimétricos sucessivos (curva-curva, tangente-curva) do segmento. A classificação de um segmento de rodovia dá-se em três casos distintos:
- ✓ Caso 1 – Projeto bom: o módulo da diferença entre as velocidades operacionais de elementos planimétricos sucessivos não deve ser superior a 10 km/h. Segmentos de rodovia que se enquadram nesse caso apresentam consistência no alinhamento horizontal quanto à sucessão de curvas e tangentes e não necessitam de correções. Este caso representa uma situação ideal entre o projeto e a utilização da via;
 - ✓ Caso 2 – Projeto regular: o módulo da diferença entre as velocidades operacionais de elementos planimétricos sucessivos deve ocorrer entre 10 km/h e 20 km/h. Segmentos de rodovias que se enquadram nesse caso apresentam problemas de inconsistência geométrica e devem sofrer adaptações a fim de restabelecer as condições de segurança;
 - ✓ Caso 3 – Projeto fraco: o módulo da diferença entre as velocidades operacionais de elementos planimétricos sucessivos é superior a 20 km/h. Segmentos de rodovias que se enquadram neste caso estão com sérios problemas de dimensionamento, e os elementos planimétricos devem ser reprojatados a fim de se restabelecer condições mínimas de segurança.
- (iii) Critério de segurança III: este critério analisa a diferença entre o coeficiente de atrito de projeto e o coeficiente de atrito efetivo na superelevação. Existem alguns modelos para a estimativa desses coeficientes. Esses modelos são calibrados conforme as características de cada país ou região. A classificação do critério de segurança segundo os coeficientes de atrito é feita em três categorias:
- ✓ Caso 1 – Projeto bom: a diferença entre o coeficiente de atrito de projeto e o coeficiente de atrito efetivo deve ser superior a +0,02. Este caso representa uma situação ideal entre o projeto e a utilização da via, e não há a necessidade de correções;

- ✓ Caso 2 – Projeto regular: a diferença entre o coeficiente de atrito de projeto e o coeficiente de atrito efetivo deve ocorrer entre +0,02 e -0,02. A superelevação deve ser adaptada para restabelecer as condições de segurança;
- ✓ Caso 3 – Projeto fraco: a diferença entre o coeficiente de atrito de projeto e o coeficiente de atrito efetivo é inferior a -0,02. Os segmentos devem ser reprojetados.

Como a análise de cada um desses critérios é feita de forma separada, Lamm *et al.* (1990), *apud* Garcia, 2008), sugerem uma composição entre os critérios I, II e III para a classificação do projeto de um segmento de rodovia, que pode ser visualizada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação segundo a composição dos critérios I, II e III.

Classificação ponderada	Critério I	Critério II	Critério III
Projeto bom	Bom	Bom	Bom
	Bom	Bom	Regular
	Bom	Bom	Fraco
Projeto regular	Regular	Regular	Regular
	Regular	Regular	Bom
	Regular	Regular	Fraco
	Bom	Regular	Fraco
Projeto fraco	Fraco	Fraco	Fraco
	Fraco	Fraco	Bom
	Fraco	Fraco	Regular

Fonte: Lamm *et al.* (1988), *apud* Trentin (2007).

Método proposto por Krammes *et al.*

Krammes *et al.* (1993), *apud* FHWA (2000), conduziram uma pesquisa extensa em coleta dados de alinhamento horizontais para desenvolver um modelo de perfil de velocidade a fim de verificar a consistência de projeto.

O modelo do perfil de velocidade sugerido incorpora características do modelo desenvolvido por Lamm *et al.* (1990), *apud* Garcia (2008), e do modelo suíço. O estudo foi realizado em 138 curvas em 3 regiões dos Estados Unidos.

Krammes *et al.* (1993), *apud* FHWA (2000), mostraram que a velocidade operacional excede a velocidade de projeto em curvas horizontais quando a velocidade de projeto é igual ou menor que 90 km/h. O modelo utiliza a variação da velocidade de operação entre as tangentes e a curva como a principal medida para a consistência de projeto.

Método proposto por Fitzpatrick

O método proposto por Fitzpatrick *et al.* (2000a) baseou-se no estudo de Lamm *et al.* (1990), *apud* Garcia (2008). Esse método consiste em um modelo de previsão de velocidade operacional para várias condições de alinhamento horizontal e vertical e em uma classificação para a consistência geométrica segundo os seguintes pontos: a diferença das velocidades de operação entre as tangentes e a curva sucessiva e a diferença das velocidades de operação e de projeto.

O modelo utilizado no software IHSDM, no módulo de análise de consistência (DCM), é o modelo proposto por Fitzpatrick *et al.* (2000a). A classificação do projeto é feita obedecendo as mesmas categorias propostas por Lamm *et al.* (1990), *apud* Garcia (2008). Também, segundo este autor, um projeto classificado como bom é considerado consistente.

3.2.2 Procedimentos para determinação da velocidade limite

A velocidade regulamentar, também denominada de limite de velocidade (ou velocidade limite), é a velocidade máxima permitida para uma rodovia ou segmentos desta.

Os limites estabelecidos para as velocidades representam os valores máximos permissíveis e não deveriam ser excedidos pelos motoristas nas condições ideais da via. Fora das condições ideais, a velocidade praticada pelos motoristas deve ser inferior ao limite de velocidade da via (Lamm *et al.*, 1999).

Com o objetivo principal de aumentar a segurança das vias, determinar velocidades limites mais seguras e compatíveis com as características da via e com sua operação, além de atender as expectativas dos motoristas, um grande número de estudos e métodos para estabelecer velocidades limites tem sido desenvolvidas em todo mundo.

O TRB (1998) fez uma revisão dos principais métodos praticados para estabelecimento de limites de velocidade e os classificou em: limites estatutários, limites ótimos, limites baseados em estudos de engenharia, limites baseados em sistemas especialistas e limites de velocidades variáveis.

a) Limite Estatutário

Os limites estatutários são aqueles estabelecidos por lei (TRB, 1998), e impõem orientações gerais aos motoristas. Em determinados casos, os limites estatutários precisam ser complementados por limites mais específicos para certos trechos, já que são muito genéricos e podem, em certas ocasiões, corresponder a limites altos ou baixos demais para determinadas condições da via (Tsu, 2003).

No Brasil e em diversos países existem leis nacionais que estabelecem velocidades limites máximas para cada classe funcional da via, e deixam a critério dos órgãos gestores de trânsito a elaboração de estudos técnicos visando o estabelecimento de velocidade limite para cada via, cujo valor deve ser inferior à máxima velocidade estabelecida por lei.

As normas vigentes sobre velocidade limites de veículos no trânsito brasileiro são estabelecidas pelo Código de Trânsito Brasileiro – CTB, em seus artigos 60, 61 e 62 (Brasil, 1997). O artigo 61 estabelece que para rodovias definidas como vias rurais pavimentadas, em locais sem sinalização indicadora da velocidade máxima, os valores a serem aplicados são:

- 110 km/h para automóveis e caminhonetes;
- 90 km/h para ônibus e microônibus;
- 80 km/h para os demais veículos.

Em rodovias rurais não pavimentadas, designadas como estradas, a velocidade limite sugerida é de 60 km/h, independente do tipo de veículo (Brasil, 1997).

A velocidade mínima, artigo 62 CTB (Brasil, 2007), não poderá ser inferior à metade da velocidade máxima estabelecida, respeitadas as condições operacionais de trânsito e da via.

Os limites de velocidade sugeridos pelo código de Trânsito Brasileiro (Brasil, 1997) podem ser modificados, por meio de sinalização, para velocidades superiores ou inferiores, pelos órgãos ou entidades de trânsito ou rodoviário com circunscrição sobre as vias.

A Resolução do CONTRAN nº 180/2005 (CONTRAN, 2007) estabelece que a velocidade máxima permitida em cada via deve ser indicada por meio de placas específicas. A Tabela 3.2 apresenta as diretrizes básicas para regulamentação da velocidade máxima permitida para diferentes tipos vias e veículos.

Tabela 3.2: Diretrizes Básicas para Regulamentação da Velocidade Máxima Permitida para vias Rurais.

Classificação Viária Art. 60 CTB	Indicadores Físicos	Nº de Faixas de Trânsito por Sentido	Velocidade Máxima Permitida (km/h)	
			Autos Motos Camionetes	Caminhões Ônibus Demais Veículos
Rodovia	Pista dupla em área rural	2 ou mais	90 a 120	80 ou 90
	Pista dupla em área urbana	2 ou mais	Ver nota 1	Ver nota 1
	Pista simples com sentido de circulação único em área rural	2 ou mais	100 a 120	80 ou 90
	Pista simples com sentido de circulação único em área urbana	2 ou mais	Ver nota 1	Ver nota 1
	Pista simples com sentido de circulação único em área rural	1 ou mais	80 a 110	70 ou 80
	Pista simples com sentido de circulação único em área urbana	1 ou mais	Ver nota 1	Ver nota 1
Estrada	Pista simples em área rural	1 ou mais	50 ou 70	40 a 70
	Pista simples área urbana	1 ou mais	Ver nota 1	Ver nota 1

Fonte: CONTRAN, 2007.

Em casos em que determinado trecho da via rural esteja inserido em áreas urbanas, e as características operacionais sejam similares às de vias urbanas, as diretrizes básicas a serem seguidas deverão ser aquelas para vias urbanas, que são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Diretrizes Básicas para Regulamentação da Velocidade Máxima Permitida para vias Urbanas.

Classificação Viária Art. 60 CTB	Indicadores Físicos	Nº de Faixas de Trânsito por Sentido	Velocidade Máxima Permitida (km/h)
Via de Trânsito Rápido	Pista simples com sentido de circulação único ou duplo	2 ou mais	80 ou 90
	Pista dupla		
Via Arterial	Pista simples ou dupla	2 ou mais	60 ou 70
	Pista simples ou dupla	1	50 ou 60
Via Coletora	Pista simples ou dupla	1 ou mais	40 ou 50
Via Local	Pista simples ou dupla	1 ou mais	30 ou 40

Fonte: CONTRAN, 2007.

Há países, como é o caso dos Estados Unidos, em que não existe um limite nacional máximo de velocidade. Cada estado tem autonomia para estabelecer seus próprios limites de velocidade máximos para as vias que estão sob sua jurisdição.

Quando este tipo de limite de velocidade não é adequado para um trecho ou via específica, zonas de velocidade podem ser definidas administrativamente. Essa recomendação é apresentada no Código Brasileiro de Trânsito (Brasil, 1997), em seu artigo 61, 2º§: o órgão ou entidade de trânsito ou rodoviário com circunscrição sobre a via poderá regulamentar, por meio de sinalização, velocidades superiores ou inferiores àquelas estabelecidas no parágrafo anterior.

As zonas de velocidade são trechos de ruas ou rodovias onde a velocidade limite estatutária não é apropriada e um limite baseado em estudos de engenharia precisa ser aplicado. O objetivo do uso das zonas de velocidade é estabelecer limites razoáveis e seguros para um determinado trecho da rodovia (Basso, 2008).

Existe recomendação para que a velocidade limite em zonas (ou seja trechos viários com velocidade limite específica) inclua extensões de via não muito curtas. O sistema especialista desenvolvido pelo AARB (*Australian Road Research Board*) para aplicação nos Estados Unidos denominado USLIMITS2 (Srinivasan *et al.*, 2006), do mesmo modo que o seu antecessor FHWA-USLIMITS, recomenda os comprimentos mínimos a serem adotados para as zonas de velocidade apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Comprimentos mínimos dos segmentos para efeito de definição da velocidade limite.

Velocidade Limite		Comprimento Mínimo	
Em mph	Em km/h	Em milhas	Em metros
30	48,3	0,30	482,7
35	56,3	0,35	563,2
40	64,4	0,40	643,6
45	72,4	0,45	724,1
50	80,5	0,50	804,5
55	88,5	0,55	885,0
60	96,5	1,20	1930,8
65	104,6	3,00	4827,0
70	112,6	6,20	9975,8
75	120,7	6,20	9975,8

Fonte: Adaptado de TRB, 1998.

b) Limite Ótimo

O limite de velocidade ótimo foi proposto inicialmente na década de 1960, por Oppenlander. É definido de forma a obter uma velocidade que tem como objetivo principal minimizar o custo total para a sociedade (TRB, 1998).

A velocidade limite ótima é determinada no ponto em que a curva tem um custo social de transportes mínimo de transportes para um determinado conjunto de elementos. Em geral, os custos são definidos por quilometro de viagem em função de diversos elementos entre eles: tempo de viagem, acidentes, poluição, operação do veículo, etc. A Figura 3.3 ilustra a obtenção da velocidade limite ótima.

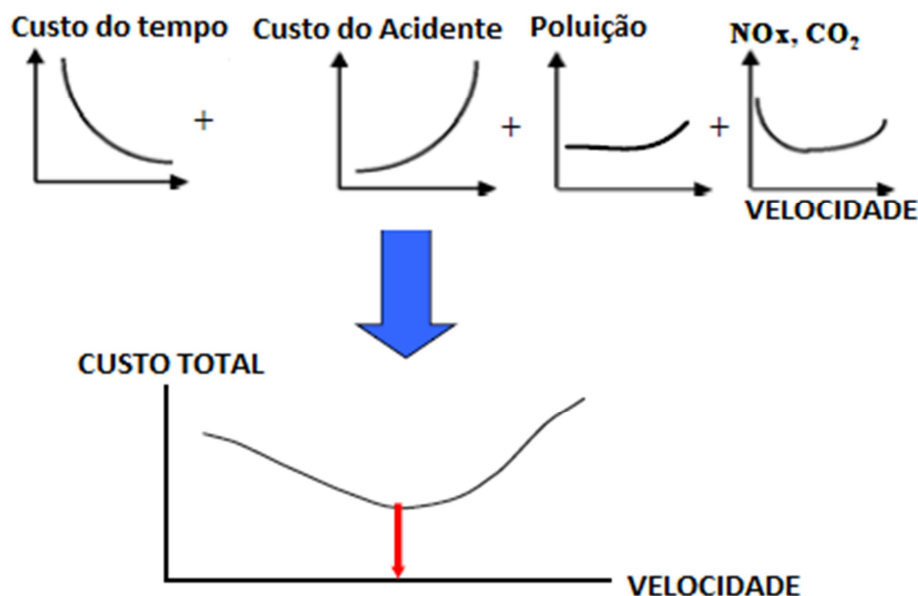


Figura 3.3: Limite ótimo de velocidade

c) Limites variáveis

Os limites de velocidades variáveis são aqueles ajustados de acordo com condições específicas do tráfego e do ambiente, fornecendo aos motoristas orientações para diferentes situações, contribuindo para uma melhor segurança nas vias.

d) Limite baseado em Estudos de Engenharia

O método mais comum e mais empregado para estabelecer limites de velocidade em zonas são os limites baseados em estudos de engenharia. Nesse a velocidade operacional é o principal critério para estabelecer a velocidade limite de uma via ou seção (TRB, 1998).

No Brasil, o Manual de Sinalização de Trânsito, aprovado pela Resolução 180/2005 (CONTRAN, 2007), estabelece que para determinar a velocidade máxima a ser regulamentada para uma via ou trecho é tomado por base a localização da via (rural ou urbana) e a classificação viária definida no CTB (Brasil, 1997). Apresenta explicitamente que o estudo de engenharia deve verificar a velocidade operacional, representada pela V_{85} ;

identificar a via urbana ou rural e a classificação viária segundo o artigo 60 do Código de Trânsito (Brasil, 1997); avaliar a existência e as condições de deslocamento lateral, do tipo transposição de faixas, movimentos, conversão e retorno; avaliar a existência e as condições de estacionamento, parada e acesso; verificar a velocidade abaixo da qual trafegam 85% dos veículos (85º percentil); avaliar as características e condições do pavimento; avaliar a existência e condições dos acostamentos; avaliar as condições de alinhamento vertical e horizontal; avaliar as condições de segurança em curvas (pode ser relacionada à velocidade de projeto); identificar os locais com situação potencial de perigo, tais como: inadequação geométrica, obras na pista, atrito lateral, passagem de nível, travessia de pedestres, área escolar; levantar e analisar as estatísticas de ocorrência de acidentes; avaliar as condições do trânsito de pedestres e ciclistas ao longo da via e avaliar a composição do tráfego considerando a incidência de veículos de grande porte.

Apesar da extensa lista de aspectos a serem considerados para a determinação da velocidade limite não há informações sobre procedimentos e indicadores para a avaliação objetiva desses elementos.

Estudos realizados nos Estados Unidos identificaram os principais critérios para a determinação da velocidade limite. Segundo tais estudos a velocidade operacional aparece como principal fator a ser considerado nos estudos de engenharia para a determinação da velocidade limite. Entre esses estudos estão os realizados por Fitzpatrick *et al.* (1997), Skaszek (2004), Fitzpatrick *et al.* (2003), entre outros.

Fitzpatrick *et al.* (1997) realizaram estudo que teve entre seus objetivos a identificação dos principais critérios adotados pelos departamentos de transporte americanos (DOTs) e municipalidades para a definição da velocidade limite. Esse estudo encaminhou aos DOTs e municipalidades 282 questionários, entre esses 168 respostas foram obtidas e apresentaram os seguintes critérios para selecionar a velocidade limite, para os dois casos:

a) Para vias em operação

- Velocidade operacional prevista (V_{85});
- Ocorrência de acidentes;
- limites máximos de velocidade definidos pelas leis estaduais;
- desenvolvimento nas laterais da via;

- geometria da via;
- atividades de estacionamento e presença de pedestres;
- velocidade segura para curvas (representando a velocidade de projeto);
- atitudes do público.

b) Para vias novas

- a velocidade de projeto é usada como velocidade limite inicial
- a velocidade limite é modificada depois que a via entre em operação, usando a V_{85} obtida por medições em campo.

O *Manual on Uniform Traffic Control Devices* - MUTCD (FHWA, 2003) estabelece que a velocidade limite deve ser igual a velocidade operacional em condições de fluxo livre, representada pela V_{85} , arredondada para o múltiplo mais próximo de 10km/h ou 5mph, outros fatores também podem ser considerados para determinar a velocidade limite, entre esses fatores estão: características da via, condições do acostamento, greide, alinhamento e distâncias de visibilidade; velocidade de ritmo (correspondente ao intervalo, em geral de 10 km/h, com a maior frequência de velocidades); desenvolvimento e ambiente viário; condições de estacionamento e atividades de pedestre; e registros de acidentes em um período mínimo de 12 meses.

3.3 TÓPICOS CONCLUSIVOS

A determinação da velocidade operacional, de uma via ou trecho de via, representada pela V_{85} dos veículos que trafegam em regime de fluxo livre é extremamente importante para a promoção da segurança viária.

A velocidade operacional tem sido utilizada para avaliar a velocidade percebida pelos usuários como segura, quando o deslocamento dos veículos é condicionado apenas as condições de projeto da via. Assim, ao compará-la com a velocidade de projeto correspondente e verificar sua variabilidade ao longo de segmentos sucessivos da via, é possível avaliar a consistência geométrica do traçado.

Ressalta-se que situações em que a velocidade operacional difere da velocidade de projeto em até 10 km/h, dependendo da consideração dos demais critérios referidos na Tabela 3.1, podem indicar boa consistência geométrica. Essa análise mostra que a velocidade de

projeto nem sempre pode ser assumida como a velocidade máxima de segurança, podendo comprometer com isso a segurança viária.

A aplicação da velocidade operacional como elemento importante na definição da velocidade limite, no método “Estudos de Engenharia” também reforçam a importância da sua determinação em campo ou sua estimativa por meio de modelos.

4. CAPÍTULO

MODELOS DE PREVISÃO DE VELOCIDADE OPERACIONAL

4.1 MODELOS DESENVOLVIDOS EM DIFERENTES PAÍSES

Vários modelos de previsão (ou estimativa) da velocidade operacional vêm sendo desenvolvidos desde meados do século passado. Na Tabela 4.1, são apresentados esses modelos, organizados por país aos quais se aplicam. Como a maioria dos modelos resulta de regressões a partir de dados coletados em campo, a Tabela 4.1 também apresenta o coeficiente de correlação obtido nas respectivas análises estatísticas, de modo que, quanto mais próximo de 1 for o R^2 , mais apropriado é o modelo.

O primeiro modelo de previsão da velocidade operacional foi desenvolvido em 1954 por Taragin (Castro, 2010). Taragin (1954), *apud* Castro (2010), coletou dados de velocidade veicular em 35 curvas de estados americanos. Seu modelo foi desenvolvido baseado em regressão linear simples e permitiu a estimativa da velocidade em curvas para o percentil 85 (V_{85}) baseado no raio planimétrico.

Depois do trabalho desenvolvido por Taragin (1954) outros estudos também foram desenvolvidos com o intuito de obter modelos de previsão de velocidade operacional, buscando identificar uma relação de causa e efeito entre as condicionantes geométricas da via e a velocidade operacional praticada nas mesmas.

A revisão bibliográfica dos modelos apresentados na Tabela 4.1, mostrou que:

- a grande maioria dos autores utilizou veículos de passeio para obter os modelos;
- a maioria dos autores desenvolveu modelos de previsão da velocidade operacional em curvas horizontais. Poucos autores estabeleceram relações para previsão da velocidade operacional em tangentes. Também, são poucos os estudos que consideraram a combinação do alinhamento horizontal e vertical para o mesmo modelo; e
- a regressão linear foi utilizada pela maioria dos autores.

Entre as variáveis empregadas nesses estudos estão o raio da curva circular (R); taxa de variação de curvatura (CCR ou CCRs); grau de curvatura (DC); comprimento da curva (L); ângulo de deflexão (Δ); superelevação (e); taxa de curvatura vertical (K); comprimento das tangentes (TL); largura da faixa (LW); largura do acostamento (SW) e declividade da via (I). Sendo o raio da curva horizontal (circular) a variável mais utilizada nos modelos de previsão da velocidade operacional.

Além dos elementos do alinhamento vertical, horizontal e seção transversal, alguns autores utilizaram em seus modelos de previsão da V_{85} outras variáveis independentes como limite de velocidade (SL); densidade de acessos (AD); tráfego médio diário (T_{ADT}) e velocidade diretriz (V_d).

Tabela 4.1: Modelos de Previsão da Velocidade Operacional.

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Estados Unidos	1954	Taragin	$V_{85} = 88.87 - \frac{2554.76}{R}$	0,86	R – raio da curva circular [m]	(1) (2)
Austrália	1978	McLean	$V_{85} = 101.2 - 0.075 \times CCRs = 101.2 - 2.73 \times DC$	0,87	DC – grau de curvatura [°/100 pés] CCR_s – taxa de variação da curvatura [gon/km]	(3)
Austrália	1979	McLean	$V_{85} = 53.80 + 0.464 \times V_F - \frac{3260}{R} + \frac{85000}{R^2}$	0,92	R – raio da curva circular [m] V_F – velocidade desejada [km/h]	(2) (5)
Alemanha	1984	<i>Guidelines for the Design of Roads</i>	$V_{85} = 60 + 39.70 \times e^{(-3.98 \times 10^{-3} \times CCR_s)}$	0,79	CCR_s – taxa de variação da curvatura [gon/km]	(3)
Estados Unidos	1983	Glennon <i>et al.</i>	$V_{85} = 93.8 - 2.59 \times DC$	0,84	DC – grau de curvatura [°/100 pés]	(5)
França	1986	SETRA/DLI	$V_{85} = \frac{102}{1 + 346 \times \left(\frac{CCR_s}{63700}\right)^{1.5}}$	–	CCR_s – taxa de variação da curvatura [gon/km]	(6)
Estados Unidos	1987	Lamm <i>et al.</i>	$V_{85} = 95.78 - 0.076 \times CCR$ $V_{85} = 96.152 - 0.302 \times DC$	–	CCR – taxa de variação da curvatura [gon/km] DC – grau de curvatura [°/100 pés]	(4)

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Estados Unidos	1987	Lamm and Choueiri	$V_{85} = 94.39 - \frac{3189.24}{R}$	0,79	R – raio da curva circular [m]	(8)
Estados Unidos	1988	Lamm <i>et al.</i>	$V_{85} = 94.37 - 1.83 \times DC$	0,79	DC – grau de curvatura	(5)
Grécia	1990	Kanellaidis <i>et al.</i>	$V_{85} = 32.20 + 0.839 \times V_d + \frac{2226.9}{R} - \frac{533.6}{\sqrt{R}}$ $V_{85} = 109.09 - \frac{3837,55}{R}$ $V_{85} = 129.88 - \frac{623,1}{\sqrt{R}}$	0,93 0,65 0,77	V_d – velocidade diretriz [km/h] R – raio da curva circular [m]	(1) (2)
Alemanha	1993	Lamm	$V_{85} = \frac{10^6}{8270 + 7,2 \times CCR}$	0,73	CCR – Taxa de variação da curvature [gon/km]	(1) (2)

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Estados Unidos	1994	Islam and Seneviratne	$V_{85(MC)} = 103.03 - 2.41 \times DC - 0.029 \times DC^2$ $V_{85(PC)} = 95.41 - 1.48 \times DC - 0.029 \times DC^2$ $V_{85(PT)} = 96.11 - 1.07 \times DC$	0,98 0,98 0,98	DC – Grau de curvatura [°/100 pés]	(7) (9)
Nova Zelândia	1994	Bennett	$V_{85} = 61.58 + 0.4854 \times V_a - \frac{4516}{R}$	–	V_a – velocidade na aproximação [km/h] R – raio da curva circular	(11) (8)
Estados Unidos	1999	Pasetti and Fambro	$V_{85} = 103.90 - \frac{3020.50}{R}$	0,68	R – raio da curva circular	(2)
Estados Unidos	2000	Fitzpatrick <i>et al.</i>	1 – Curva horizontal em rampa descendente: $-9\% \leq G < -4\%$ $V_{85} = 102.10 - \frac{3077.13}{R}$	0,58	R – raio da curva circular [m]	(13) (14)
			2 – Curva horizontal em rampa descendente: $-4\% \leq G < 0\%$ $V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$	0,76	R – raio da curva circular [m]	
			3 – Curva horizontal em rampa ascendente: $0\% \leq G < 4\%$ $V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$	0,76	R – raio da curva circular [m]	
			4 – Curva horizontal em rampa ascendente: $4\% \leq G < 9\%$ $V_{85} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$	0,53	R – raio da curva circular [m]	

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Estados Unidos	2000	Fitzpatrick <i>et al.</i>	5 – Curva horizontal combinada com curva vertical côncava $V_{85} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$	0,92	R – raio da curva circular [m]	(13) (14)
			6 – Curva horizontal combinada com curva vertical convexa sem restrição de visibilidade. Usar a menor velocidade obtida em 1 ou 2 (para rampas descendentes) e 3 ou 4 (para rampas ascendentes). No caso da velocidade desejada ser menor do que este valor adotar a velocidade desejada como sendo a V ₈₅ .	n/a		
			7 – Curva horizontal combinada com curva vertical convexa com restrição de visibilidade (K ≤ 43m/%) $V_{85} = 103.24 - \frac{3576.51}{R}$ Calcular a menor velocidade obtida em 1 ou 2 (para rampas descendentes) e 3 ou 4 (para rampas ascendentes). Comparar com a fornecida pela equação e adotar o menor valor.	0,74	R – raio da curva circular [m] K – taxa de curvatura vertical [m/%]	
			8 – Curva vertical côncava em trecho em tangente horizontal V ₈₅ = velocidade desejada assumida pelo condutor	n/a		

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Estados Unidos	2000	Fitzpatrick <i>et al.</i>	9 – Curva vertical convexa sem restrição de visibilidade (Km>43m/%) em trecho em tangente horizontal V_{85} = velocidade desejada assumida pelo condutor	n/a		(13) (14)
			10 – Curva vertical convexa com restrição de visibilidade em trecho em tangente horizontal $V_{85} = 105.08 - \frac{149.69}{K}$	0,60	K – taxa de curvatura vertical [m/%]	
			11 – Resultado do estudo da V_{85} em tangente (V_{85T}) – os valores observados variaram de 93 a 104km/h - os autores recomendam adotar $V_{85T} = 100\text{km/h}$ como a velocidade desejada em longas tangentes.	n/a	V_{85T} – 85 percentil da velocidade em regime de fluxo livre, medida no centro da tangente [km/h]	
Estados Unidos	2000	Polus <i>et al.</i>	1 – Raio pequeno: $R \leq 250\text{m}$; Tangente curta: $TL < 150\text{m}$ $V_{85T} = SP = 101.11 - 3420/GM_S$	0,553	GM_S – medida geométrica da seção em tangente e curvas associadas para tangentes curtas [m] em que: $GM_S = (R_1 + R_2)/2$	(15)
			2 – Raio pequeno: $R \leq 250\text{m}$; Tangente média: $150\text{m} \leq TL \leq 1000\text{m}$ $V_{85T} = SP = 105.00 - 28.107/e^{(0.00108 \times GM_L)}$	0,742	GM_L – medida geométrica da seção em tangente e curvas associadas para tangentes longas [m] em que: $GM_L = [TL + (R_1 + R_2)^2]/100$	

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Estados Unidos	2000	Polus <i>et al.</i>	3 – Raio médio: $R > 250\text{m}$; Tangente média: $150\text{m} \leq TL \leq 1000\text{m}$ GM_L (1500 a 7500) $V_{85T} = SP = 97.73 + 0.00067 GM_L$	0,200	GM_L - medida geométrica da seção em tangente e curvas associadas para tangentes longas [m]	(15)
			4 – Raio “razoável”: não viola o critério de raio mínimo para a velocidade definida para o projeto; Tangente longa: $TL > 1000\text{m}$ $V_{85T} = SP = 105.00 - 22.953/e^{(0.00012 \times GM_L)}$	0,838	GM_L - medida geométrica da seção em tangente e curvas associadas para tangentes longas [m] em que: $GM_L = [TL + (R_1 + R_2)^2]/100$	
Estados Unidos	2002	Schurr <i>et al.</i>	$V_{85} = 103.3 - 0.1253 \times DA + 0.0238 \times L - 1.038 \times G_1$	0,46	L – comprimento da curva [m] G_1 – inclinação na aproximação da curva [%] $DA = \Delta$ – ângulo de deflexão [°]	(15)
			$V_{85T} = V_{85, pp} = 70.2 + 0.434 \times V_P - 0.001307 \times T_{ADT}$ $V_P = SL$	0,19	T_{ADT} – Tráfego médio diário [veículos/dia] SL – velocidade limite da via [km/h]	
Estados Unidos	2003	Fitzpatrick <i>et al.</i>	Global: $V_{85T} = 12.4 + 0.98 \times SL$	0,904	SL – velocidade limite da via [km/h]	(16) (17)
	2005	Fitzpatrick <i>et al.</i>	Global: $V_{85T} = 25.9 + 0.83 SL - 0.054 AD$	0,923	SL – velocidade limite da via [km/h] AD – densidade de acessos	
			Via urbana/suburbana arterial: $V_{85T} = 13.952 + 0.963 \times SL$	0,86	SL – velocidade limite da via [km/h]	
			Via urbana/suburbana coletora: $V_{85T} = 34.021 + 0.639 \times SL$	0,41	SL – velocidade limite da via [km/h]	

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Estados Unidos	2003	Fitzpatrick <i>et al.</i>	Via urbana/suburbana local: $V_{85T} = 16.607 + 0.776 \times SL$	0,14	SL – velocidade limite da via [km/h]	(16) (17)
	2005	Fitzpatrick <i>et al.</i>	Via arterial rural: $V_{85T} = 58.689 + 0.517 \times SL$	0,81	SL – velocidade limite da via [km/h]	
Itália	2007	Dell’Acqua <i>et al.</i>	$V_{env} = 82.84 - 0.1033 \times CCR + 3.44 \times L$ $V_{85} = \frac{-2073.70}{R} + \frac{31029}{R^2} + 0.87 \times V_{env}$	0,81	L – comprimento da curva [m] R – raio da curva circular [m] V_{env} – velocidade ambiental	(12)
Iraque	2008	Abdul–Mawjoud and Sofia	$V_{85} = 17.749 + 0.5 \times V_a + 0.05203 \times R - 0.161 \times \Delta + 1.416 \times e$	0,947	V_a – velocidade na aproximação [km/h] Δ – ângulo de deflexão [°] e – superelevação [m/m]	(11)
			Greide: Subida < 3% $V_{85} = 0.790 \times V_a + 0.0259 \times R$	0,998	V_a – velocidade na aproximação [km/h] R – raio da curva circular [m]	
			Greide: Subida $\geq 3\% \leq 9.3\%$ $V_{85} = 0.917 \times V_a + 0.4321 \times R + 0.06802 \times R$	0,928	V_a – velocidade na aproximação [km/h] R – raio da curva circular [m]	

País	Ano	Autor	Modelo	R ²	Variáveis explicativas	Fonte
Iraque	2008	Abdul–Mawjoud and Sofia	Greide: Descida < 3% $V_{85} = 0.917 \times V_a + 0.02431 \times R - 0.300 \times \Delta$	0,998	V_a – velocidade na aproximação [km/h] R – raio da curva circular [m] Δ – ângulo de deflexão [°]	(11)
			Greide: Descida ≥ 3% e 9.3% $V_{85} = 0.636 \times V_a + 0.09481 \times R$	0,994	V_a – velocidade na aproximação [km/h] R – raio da curva circular [m]	
Brasil	2008	Garcia	$V_{85} = 93.1545 - \frac{1666.1716}{R} - 1.1872 \times Lado - 0.4654 \times I - 1.3426 \times A$	0,547	R – raio da curva circular [m] $Lado$ – dummy lado [1 – esquerda; 0 – direita ou sem curva] I – declividade da via [%] A – dummy aclone [1 – aclone; 0 – declive ou nível]	(10)
Espanha	2008	Castro <i>et al.</i>	$V_{85} = 120.16 - 5596.72/R$	–	R – raio da curva	(4)

(1) Gong, H. (2007); (2) Misaghi and Hassan (2005); (3) Lamm *et al.* (1995); (4) Castro *et al.* (2010); (5) Tarris *et al.* (1997); (6) Bella (2005); (7) TRB (2011); (8) Faezin *et al.* (2011); (9) Islam and Seneviratne (1994); (10) Garcia (2008); (11) Abdul-Mawjoud and Sofia (2008); (12) Dell’Acqua *et al.* (2007); (13) Fitzpatrick *et al.* (2000a); (14) Fitzpatrick *et al.* (2000b); (15) Fitzpatrick *et al.* (2003); (16) Fitzpatrick *et al.* (2005) e (17) Fitzpatrick *et al.* (2003).

4.2 ÍNDICES DE ALINHAMENTO NA PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL

Índices de alinhamento são medidas quantitativas de caráter geral que representam o alinhamento de um segmento viário (Fitzpatrick *et al.*, 2003).

Fitzpatrick *et al.* (2000b) realizaram um trabalho onde avaliaram a aplicabilidade de índices de alinhamento horizontal, vertical e composição desses; para estabelecer modelos de previsão de velocidades operacionais para longas tangentes de rodovias de pista simples. A hipótese inicialmente levantada para tal estudo foi que índices de alinhamento podem ser usados para medir quantitativamente, de forma geral, o alinhamento da via, e que podem também refletir a expectativa dos motoristas quanto a sua velocidade.

Inicialmente Fitzpatrick *et al.* (2000b) consideraram os índices de alinhamento apresentados na Tabela 4.2, sendo que, posteriormente, alguns índices foram descartados. Os critérios avaliados para selecionar os índices de alinhamento foram que:

- os índices de alinhamento devem ser rigorosamente função da geometria da rodovia; e
- existir correlação entre os índices de alinhamento e a velocidade operacional (V_{85}).

A Tabela 4.2 apresenta uma lista dos índices de alinhamento horizontal selecionados para este estudo, mostra também as equações utilizadas para calcular os respectivos índices de alinhamento.

Tabela 4.2: Índices do alinhamento.

Índices do alinhamento horizontal • Taxa de mudança de curvatura – CCR (graus/km) $CCR = \frac{\sum I_i}{\sum L_i}$ Onde: I_i = ângulo de deflexão da i-ésima curva, em graus; L_i = comprimento do trecho da seção onde está a curva, em km; • Grau de curvatura – DC (graus/km) $DC = \frac{\sum DC_i}{\sum L_i}$ Onde: DC_i = grau de curvatura da i-ésima curva, em graus L_i = comprimento do trecho da seção onde está a curva, em km • Comprimento em curva (CL)/ Comprimento da via (RL) $\frac{CL}{RL} = \frac{\sum CL_i}{\sum L_i}$ Onde: CL_i = comprimento em curva da seção i da via (m) L_i = comprimento da seção i da via (m) • Raio médio – AVG R (m) $AVGR = \frac{\sum R_i}{\sum n}$ Onde: R_i = raio da i-ésima curva da seção (m) n = número de curvas na seção • Tangente média – AVGT (m) $AVGT = \frac{\sum T_i}{\sum n}$ Onde: T_i = comprimento da i-ésima tangente da seção (m) n = número de tangentes na seção	Índices do alinhamento vertical • Taxa de mudança de curvatura vertical – VCCR (graus/km) $VCCR = \frac{\sum A_i}{\sum L_i}$ Onde: A_i = absoluta diferença dos greides concordados da i-ésima curva, em graus; L_i = comprimento do trecho da seção onde está a curva, em km • Taxa média de curvatura vertical – VAVG K (km/%) $VAVG K = \frac{\sum \left(\frac{L}{ A } \right)}{n}$ Onde: L = comprimento da seção, em km; A = diferença algébrica dos greides concordados, em % n = número de curvas verticais • Gradiente médio – VAVGG (m/km) $VAVGG = \frac{\sum (\Delta E_i)}{\sum L_i}$ ΔE_i = comprimento em curva da seção i da via (m) diferença de cota entre os pontos de inflexão vertical (m) L_i = comprimento do trecho da seção onde a diferença de cotas foi medida (m) Índices de composição dos alinhamentos • Combinação – CCR COMBO (graus/km) $COMBO = \frac{\sum (I_i)}{\sum L_i} + \frac{\sum (A_i)}{\sum L_i}$ Onde: A_i = absoluta diferença dos greides concordados da i-ésima curva, em graus; L_i = comprimento do trecho da seção onde está a curva, em km I_i = ângulo de deflexão da i-ésima curva, em graus;
--	--

Fonte: Fitzpatrick *et al.* (2000b).

O grau de curvatura é, por definição, o ângulo central (D) correspondente a uma corda de 100 pés. Assumindo que o comprimento da corda é aproximadamente igual ao comprimento do arco correspondente, tem-se que:

$$D [\text{gr}^\circ] = \frac{360}{2\pi} \times \frac{100[\text{pés}]}{R[\text{pés}]} = \frac{5730}{R[\text{pés}]}$$

para um arco de 30.48m, e assumindo R em metros, tem-se:

$$D [\text{gr}^\circ] = \frac{360}{2\pi} \times \frac{30.48[m]}{R[m]} = \frac{1746.38}{R[m]}$$

$$D [\text{gr}^\circ] = \frac{360}{2\pi} \times \frac{30.48[m]}{R[m]} = \frac{1746.38}{R[m]}$$

Fitzpatrick (2000b) destaca que o uso índice de alinhamento COMBO privilegia muito mais as características do alinhamento horizontal, uma vez que a ordem de grandeza do CCR horizontal é muito maior do que o CCR vertical.

Uma observação a ser feita com relação ao índice taxa média de curvatura vertical –VAVG K (km/%) é que esse equivale ao parâmetro de curvatura (ou simplesmente parâmetro k) apresentado pelo DNER(1999).

4.3 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Os modelos para a estimativa da velocidade operacional, em geral, realizam esta estimativa considerando segmentos homogêneos de forma isolada (trechos em curva e trechos em tangente). Estes modelos têm sido utilizados na análise da consistência geométrica de projetos e, portanto, as vantagens do seu aprimoramento continuado são indiscutíveis. Além disso, como além das condições de geometria propriamente ditas eles refletem a prática da direção veicular do conjunto de motoristas e até as características gerais dos veículos, é importante que sejam calibrados e/ou ajustados para cada realidade e, mesmo, revisados ao longo do tempo. Daí encontrarem-se modelos distintos para diferentes países e modelos diferentes para um mesmo país em momentos diferentes no tempo.

Entretanto, para efeito de estudos voltados à definição de zonas de velocidade, cuja extensão não pode ser muito reduzida para não comprometer a segurança, é conveniente que esses modelos sejam complementados por estimativas da velocidade operacional em trechos que incluam um ou mais segmentos homogêneos.

Neste sentido, uma investigação da relação entre a velocidade e índices geométricos que representem as condições de alinhamento horizontal e vertical ao longo trechos torna-se relevante.

No próximo Capítulo é apresentado um método para a realização desse tipo de investigação.

.

5. CAPÍTULO

MÉTODO PARA ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL EM TRECHOS DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

O estudo da velocidade operacional em trechos de rodovias de pista simples, cujas etapas e procedimentos serão apresentados a seguir, visa alcançar os objetivos da pesquisa que são: estudar a velocidade operacional em trechos viários com base nas suas características geométricas, expressas em índices que refletem as condições gerais do alinhamento horizontal e vertical do trecho; fazer uma análise crítica da velocidade operacional com relação à velocidade de projeto em cada trecho; e desenvolver um modelo de previsão para a velocidade operacional.

Na Figura 5.1 é apresentada a estrutura geral do método proposto, a partir do qual é possível identificar as etapas metodológicas e suas principais atividades. Cada uma das etapas identificadas na Figura 5.1 é detalhada a seguir.

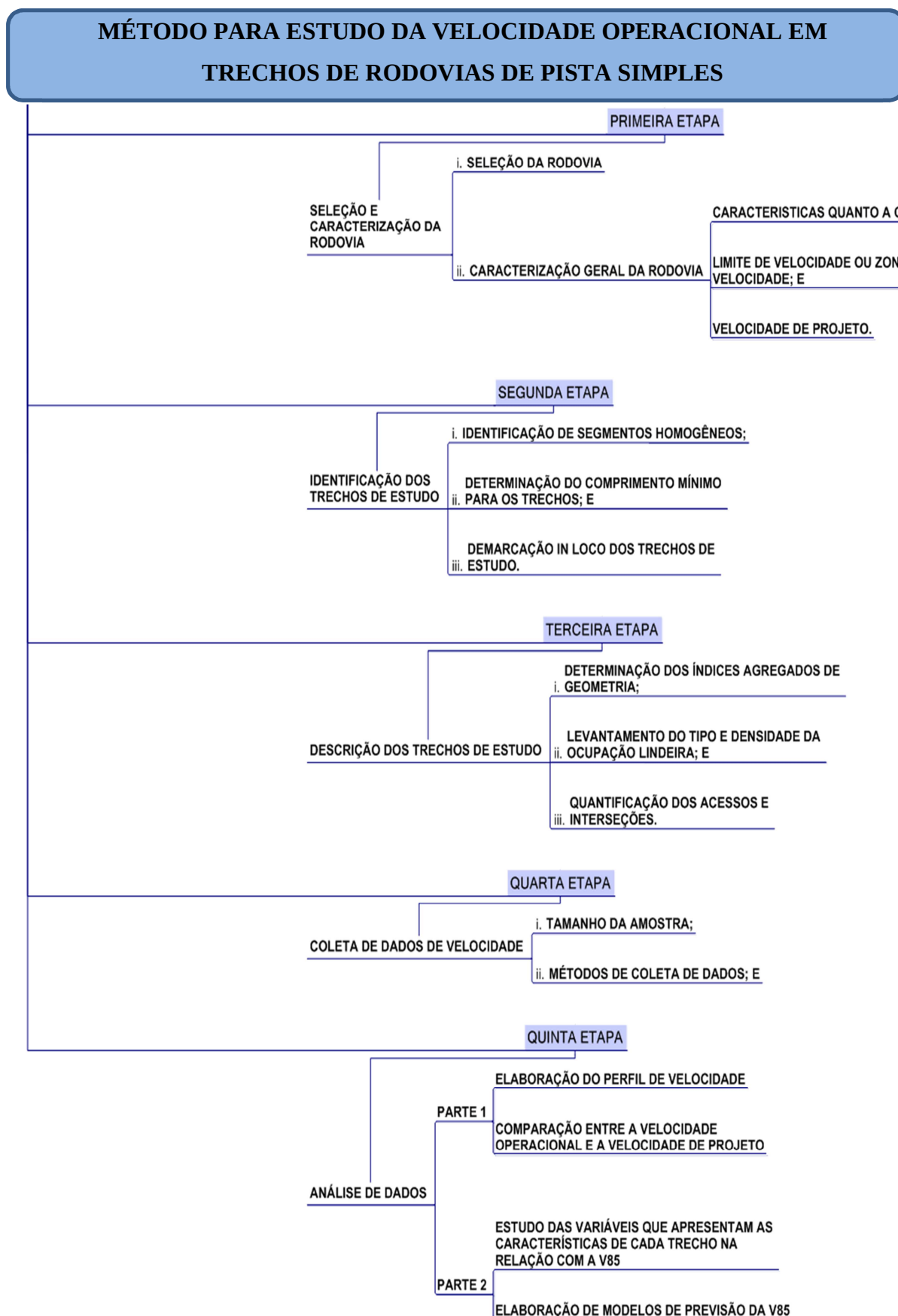


Figura 5.1: Estrutura Geral do Método da Pesquisa

5.1 PRIMEIRA ETAPA: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA

Esta primeira etapa consiste na seleção e caracterização geral da rodovia. A seleção tem como princípio básico atender aos seguintes critérios inicialmente previstos:

- (i) ser uma rodovia rural, não inserida em área urbana (os trechos inseridos em áreas urbanas não serão objeto de estudo deste trabalho);
- (ii) possuir trechos em pista simples;
- (iii) não possuir sistemas de fiscalização eletrônica ao longo da extensão prevista para o estudo; e
- (iv) pavimento em boas condições. Os segmentos de rodovias selecionados devem possuir boas condições de trafegabilidade. Segundo o CNT (2010), rodovias que apresentam irregularidades no pavimento, como presença de buracos, reduzem a velocidade, em média, em 8,5 km/h e rodovias com pavimento totalmente destruído a reduzem em 31,8 km/h.

Assim, definida a rodovia, parte-se para a caracterização geral da mesma quanto à geometria, limite de velocidade (ou zonas de velocidade) e velocidade de projeto.

Para caracterização quanto à geometria deverá ser obtido o projeto geométrico da rodovia, junto ao órgão competente, em formato impresso e/ou formato digital. O projeto geométrico possibilitará a obtenção de elementos básicos do alinhamento horizontal, vertical e da seção transversal, esses apresentados no Capítulo 2.

Outro aspecto importante a ser identificado para a rodovia selecionada é o seu limite de velocidade. O valor desse limite deverá ser observado *in loco*, por meio da sinalização vertical de regulamentação empregada (sinal R-19), ou levando em conta o disposto no Código de Trânsito Brasileiro para o caso de rodovias sem sinalização de regulamentação da velocidade.

Caso a rodovia em análise apresente zonas de velocidade diferenciadas, essas também deverão ser demarcadas no projeto com seus respectivos valores, a fim de que possam ser adequadamente consideradas em uma etapa seguinte.

Finalmente, a velocidade de projeto também é um parâmetro importante a ser considerado, sobretudo devido à sua importância para este trabalho, devendo, portanto, ser obtida junto ao órgão competente.

Para casos em que a velocidade de projeto não estiver disponível, Lamm *et al.* (1999) propuseram um procedimento, através do qual é possível estimar essa velocidade de projeto de um traçado existente, com base em suas características geométricas e levando em consideração a velocidade operacional prevista para a rodovia. Para tanto os seguintes passos são propostos:

1º Passo: Calcular a taxa de mudança de curvatura média ($\overline{CCRs}$) para o segmento em análise, utilizando a expressão mostrada na Equação 5.1.

$$\overline{CCRs} = \frac{\sum_{i=1}^n (CCR_{si} \times L_i)}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (5.1)$$

em que:

$\overline{CCRs}$ = taxa de mudança de curvatura média para o trecho em análise, desconsiderando as tangentes [gon/km];

CCR_{si} = taxa de mudança de curvatura da curva i [gon/km] (1gon=1grado; 1rad = 63,7 gon)

L_i = desenvolvimento da curva i [m].

2º Passo: Utilizando a taxa de mudança de curvatura calculada no 1º Passo, aplica-se tal valor em um modelo de previsão de velocidade operacional para rodovias com características similares.

3º Passo: Estimar a velocidade de projeto, considerando seu valor igual a velocidade operacional definida no 2º Passo, arredondando para múltiplos de 10km/h.

Outra forma de obter o valor da velocidade de projeto, quando ela não estiver disponível, é utilizando dados dos principais elementos geométricos da via. Existem técnicas que permitem a obtenção dos principais elementos geométricos – com uma precisão inferior a dos levantamentos topográficos – através da análise de fotos de satélites, reconstituições topográficas e da utilização de receptores GPS (do inglês *Global Positioning System*, Sistema de Posicionamento Global). Depois de obtidos esses elementos, é necessário fazer o caminho inverso e obter a velocidade de projeto a eles associada por meio das expressões analíticas que são empregadas para sua determinação na fase de projeto.

5.2 SEGUNDA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO

Os trechos a serem identificados para este estudo deverão ser formados por um ou mais segmentos homogêneos sucessivos. Neste estudo os segmentos identificados como homogêneos serão aqueles que apresentam características geométricas constantes, sobretudo em termos de alinhamento horizontal e vertical, isto é, curvas e retas; e possuem áreas lindeiras com as mesmas condições de utilização (uso e ocupação do solo); e em número de acessos a propriedades lindeiras.

Com relação à extensão mínima de cada trecho, recomenda-se adotar trechos com comprimentos mínimos recomendados para definição de zonas de velocidades apresentado pelo sistema especialista desenvolvido pelo AARB (*Australian Road Research Board*), denominado USLIMITS, conforme colocado no Capítulo 3, Tabela 3.4. Ou seja, em função da velocidade limite da via, selecionar a extensão mínima a ser adotada para cada trecho.

Assim, definidos os trechos de estudo com base no projeto geométrico da rodovia selecionada, deve-se efetuar as demarcações dos trechos ao longo da via. Para tanto devem ser adotados métodos topográficos.

5.3 TERCEIRA ETAPA: DESCRIÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO

Como apresentado na revisão bibliográfica, mas especificamente no Capítulo 4, são vários os aspectos que podem ser considerados como intervenientes na velocidade operacional dos veículos. No entanto, com base nos trabalhos já desenvolvidos sobre velocidade operacional, é importante selecionar apenas algumas variáveis explicativas para o estudo, viabilizando dessa forma a análise dos resultados obtidos em campo para a V_{85} .

De forma a associar os dados a serem coletados de V_{85} a variáveis dos trechos em estudo, é necessário uma descrição desses trechos. Essa descrição está subdividida em três atividades principais, a saber: determinação dos índices agregados de geometria; levantamento do tipo e densidade da ocupação lindeira; e quantificação dos acessos.

(i) Determinação dos índices agregados de geometria

Para esta etapa foram escolhidos índices que refletem as condições gerais do alinhamento.

Os índices agregados de geometria utilizados neste estudo podem ser separados em dois grupos. O primeiro refere-se a índices agregado do alinhamento horizontal e o segundo é formado pelos índices agregados do alinhamento vertical.

Entre os índices do alinhamento horizontal e vertical apresentados por Fitzpatrick (2000b), serão utilizados para este estudo o raio médio e a taxa média de curvatura vertical, esses apresentados nas Equações 5.2 e 5.3, respectivamente.

- Raio médio – AVG R [m]

$$AVGR = \frac{\sum R_i}{\sum n} \quad (5.2)$$

em que:

R_i = raio da i-ésima curva do trecho (m);

n = número de curvas do trecho.

- Taxa média de curvatura vertical VAVGK [m/%]

$$VAVG K = \frac{\sum \left(\frac{L}{|A|} \right)}{n} \quad (5.3)$$

em que:

L = comprimento da curva vertical, em m;

A = diferença algébrica dos greides concordados, em %; e

n = número de curvas verticais do trecho.

Além desses, outros índices que também refletem as características horizontal e vertical de cada trecho serão considerados, e são apresentados nas Equações 5.4 a 5.8. São eles:

- Sinuosidade em planta [$^{\circ}$ /km]

$$S_{planta} = \frac{\sum(|\Omega_i|)}{Extensão} \quad (5.4)$$

em que:

Ω_i = deflexão do alinhamento em planta junto à curva “i”, pertencente ao trecho estudado, em grau; e

Extensão = comprimento do trecho estudado, em km.

- Sinuosidade em perfil [%/km]

$$S_{perfil} = \frac{\sum(|A_i|)}{Extensão} \quad (5.5)$$

em que:

A_i = diferença algébrica dos greides concordados na curva vertical i, em %; e

Extensão = comprimento do trecho estudado, em km.

- Fração em tangente para alinhamento horizontal [km/km]

$$FT_iH = \frac{\sum T_i}{Extensão} \quad (5.6)$$

em que:

T_i = comprimento da tangente horizontal, em km; e

Extensão = comprimento do trecho estudado, em km.

No caso do estudo ser realizado considerando em separado os dois sentidos de circulação, é importante a determinação de fatores que diferenciem as características geométricas da via em cada sentido. Para tanto, recomenda-se a adoção dos dois fatores apresentados a seguir.

- Fator relacionado às rampas verticais ascendente ($FT_iV_{ascendente}$) [m x %]

$$FT_iV_{ascendente} = \sum (i_i \times T_i) \quad (5.7)$$

em que:

T_i = comprimento da tangente vertical i em rampa ascendente (no sentido do deslocamento), em m; e

i_i = inclinação da rampa ascendente relacionada a T_i , em %.

- Fator relacionado às rampas verticais descendentes ($FT_iV_{descendente}$) [m x %]

$$FT_iV_{descendente} = \sum(i_i \times T_i) \quad (5.8)$$

em que:

T_i = comprimento da tangente vertical em rampa descendente (no sentido do deslocamento), em m; e

i_i = inclinação da rampa descendente relacionada a T_i , em %.

Como os índices fator relacionado às rampas verticais ascendente ($FT_iV_{ascendente}$) e Fator relacionado às rampas verticais descendentes ($FT_iV_{descendente}$), são índices de alinhamento propostos por este trabalho, segue a Figura 5.2 e equações (5.9, 5.10, 5.11 e 5.12), de forma a exemplificar a determinação desses índices.

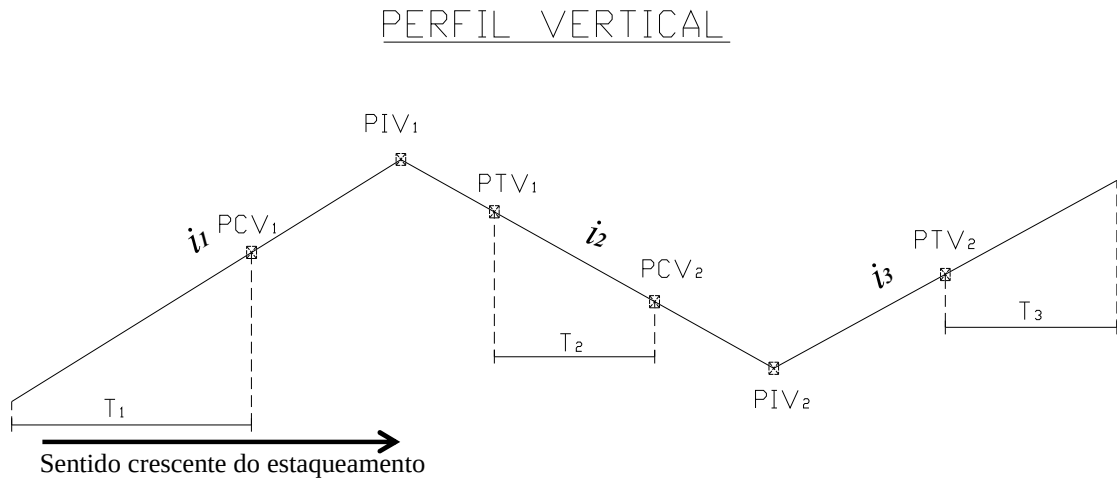


Figura 5.2: Exemplo para determinação do fator relacionado às rampas verticais ascendente e descendente

$$FT_iV_{ascendente} = i_1 \times T_1 + i_3 \times T_3 \text{ (para o sentido crescente do estaqueamento)} \quad (5.9)$$

$$FT_iV_{descendente} = i_2 \times T_2 \text{ (para o sentido decrescente do estaqueamento)} \quad (5.10)$$

$$FT_i V_{descendente} = i_2 \times T_2 \text{ (para o sentido crescente do estacionamento)} \quad (5.11)$$

$$FT_i V_{descendente} = i_1 \times T_1 + i_3 \times T_3 \text{ (para o sentido decrescente do estacionamento)} \quad (5.12)$$

(ii) Levantamento do tipo e densidade da ocupação lindeira

O levantamento do tipo e densidade da ocupação lindeira é importante no sentido de procurar identificar se o movimento de travessia de pedestres reflete em velocidades operacionais menores.

Para o levantamento do tipo e densidade da ocupação lindeira dos trechos da rodovia selecionada para este estudo, podem ser pesquisadas fontes gratuitas para obter mapas e/ou imagens de satélite de alta resolução que possibilitem tal levantamento. O *Google Maps* e/ou *Google Earth*, por exemplo, são fontes que atendem a esses requisitos, a partir das quais podem ser extraídos recortes de imagens e mapas que cobrem a área lindeira da rodovia selecionada, de forma a fazer um levantamento prévio quanto ao tipo de ocupação lindeira. No entanto, inspeções *in loco* devem ser realizadas sempre que possíveis para complementar a avaliação.

(iii) Densidade de pontos de acessos e interseções

Densidade dos acessos e interseções corresponde ao número total de pontos de acesso à rodovia e interseções, observados ao longo da extensão do trecho, dividido pelo valor da extensão.

Os resultados dessa etapa deverão ser sintetizados em uma tabela conforme exemplo mostrado na Tabela 5.1, para efeito da avaliação futura da relação entre as variáveis consideradas e os valores obtidos para a V_{85} em cada trecho. Nesse exemplo admite-se o estudo de cada trecho por sentido.

Tabela 5.1: Exemplo de tabulação dos dados de descrição dos trechos de estudo.

TRECHO -SENTIDO	ÍNDICES AGREGADOS DE GEOMETRIA							TIPO E DENSIDADE DA OCUPAÇÃO LINDEIRA	DENSIDADE DE PONTOS DE ACESSOS E INTERSEÇÕES
	Alinhamento Horizontal			Alinhamento Vertical					
	Sinuosidade em Planta	FT_iH	AVGR	VAVGK	FT_iVas	FT_iVdes	Sinuosidade em Perfil		
Trecho 1-1									
Trecho 2-1									
Trecho 3-1									
.....									
Trecho 1-2									

5.4 QUARTA ETAPA: COLETA DE DADOS DE VELOCIDADE

5.4.1 Tamanho da Amostra

Para que as medições realizadas em campo para a determinação da velocidade operacional em cada trecho possam ser consideradas representativas, existe uma quantidade mínima de observações necessárias, a qual pode ser estimada por meio da Equação 5.13 apresentada pelo ITE (ITE, 1994).

$$N = \frac{S^2 K^2 \times (2 + U^2)}{2 \times E^2} \quad (5.13)$$

Onde:

N = número mínimo de medições de velocidade;

S = desvio-padrão estimado da amostra (km/h ou mph);

K = constante correspondente ao nível de confiança desejado;

E = erro permitido na estimativa da velocidade (km/h ou mph);

U = constante correspondente ao percentil analisado.

Para a estimativa do desvio padrão da amostra, o ITE (1994) sugere a utilização da Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Desvio padrão para determinação do tamanho da amostra em estudos de velocidade local.

Área de tráfego	Tipo de Rodovia	Desvio Padrão	
		mph	km/h
Rural	Pista Simples	5,3	8,5
	Pista Dupla	4,2	6,8
Intermediária	Pista Simples	5,3	8,5
	Pista Dupla	5,3	8,5
Urbana	Pista Simples	4,8	7,7
	Pista Dupla	4,9	7,9
Valor arredondado		5,0	8,0

Fonte: Box e Oppenlander, 1796, *apud* ITE, 1994.

A constante K é um parâmetro estatístico e está relacionado com o nível de confiança desejado. Para casos de curvas de distribuição normal, como é o caso, tem-se os valores apresentados por Box e Oppenlander, 1796, *apud* ITE, 1994, apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Valores da Constante K.

Constante K	Nível de Confiança (%)
1,0	68,3
1,5	86,6
1,64	90,00
1,96	95,00
2,0	95,5
2,5	98,8
2,58	99,0
3,0	99,7

Fonte: Box e Oppenlander, 1796, *apud* ITE, 1994.

O erro permitido na estimativa da velocidade corresponde a uma tolerância em valor absoluto. De acordo com o ITE (1994), erros permitidos típicos variam entre $\pm 1,0$ mph e ± 5 mph (1,61km/h e 8,05 km/h).

A constante U é necessária para levar em consideração que não está sendo analisada a média das velocidades, mas sim um percentil específico. Para este trabalho, por exemplo, será utilizado o 85° percentil. Esta constante pode ser obtida a partir da Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Constante correspondente a percentis da velocidade.

Constante U	Percentil da Velocidade
0,00	50°
1,04	15° ou 85°
1,48	7° ou 93°
1,64	5° ou 95°

Fonte: ITE, 1994.

O ITE (1994) destaca que, para uma maior precisão, uma vez realizados os estudos com o tamanho de amostra estimado, o valor do desvio padrão pode ser efetivamente calculado. Dessa forma, é possível verificar depois se o tamanho da amostra foi realmente adequado.

Além da verificação da adequabilidade do tamanho da amostra utilizada (mediante o tratamento dos dados obtidos com a amostra definida pela Equação 5.9), no caso de rodovias de pista simples com dois sentidos de circulação, é importante verificar,

também, se a velocidade da população pode ser assumida como igual para os dois sentidos de circulação da via.

Para tanto, deve ser realizado um teste estatístico para comparação da velocidade média nos dois sentidos com base nos dados de velocidade coletados para cada sentido de circulação. Sendo a diferença entre as velocidades estatisticamente significativa para a maioria dos trechos, estes devem ser tratados em separado por sentido. Isto é, deve ser determinado o V_{85} por sentido, juntamente com os valores das variáveis relacionadas ao sentido do tráfego, que são $FT_iV_{ascendente}$ e $FT_iV_{descendente}$. Caso contrário, as observações feitas nos dois sentidos podem ser reunidas num único conjunto, a partir do qual é determinada a V_{85} representativa do trecho como um todo e não cabe a consideração das duas variáveis anteriormente referidas.

5.4.2 Métodos de coleta de dados

Vários são os métodos de coleta de dados de velocidade veicular em trechos viários. Dentre eles, por exemplo, é bastante utilizado o método de leitura de placas. Este método consiste no registro do horário do momento da passagem de cada veículo no início e término do trecho de interesse, de extensão conhecida, com a correspondente anotação de sua placa. Para tanto, pesquisadores devem estar posicionados no início e final do trecho no período estabelecido para a coleta de dados, dotados de dispositivos para realizar a coleta e registro dos dados de tempo e placa. Os veículos cujas placas foram anotadas nos dois pontos terão então sua velocidade calculada pela divisão da extensão do trecho pelo tempo gasto para percorrê-lo (ver Figura 5.3).

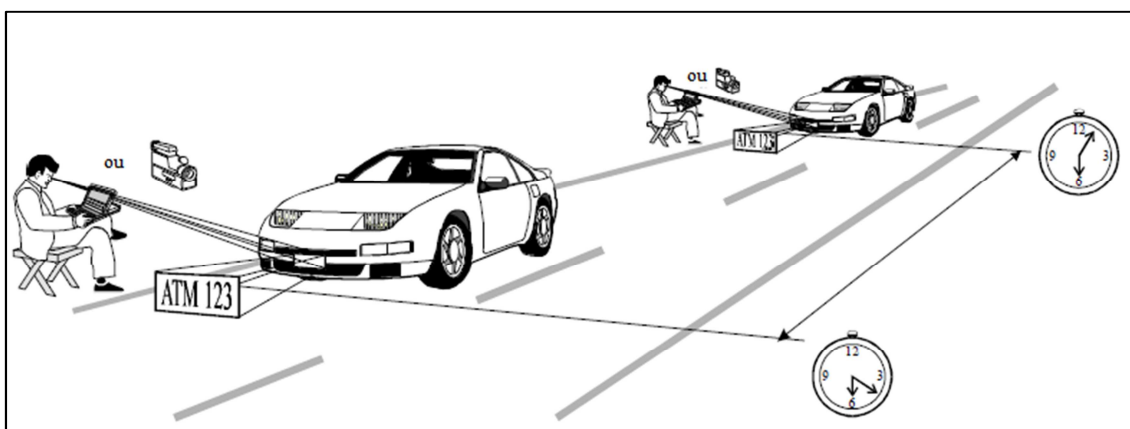


Figura 5.3: Ilustração do Método da Leitura de Placa. Fonte: FHWA, 1998.

O uso de veículo instrumentado, dotado de equipamento para medição e registro da velocidade ao longo de pontos da trajetória do veículo no trecho de interesse, também é uma possibilidade (ver Figura 5.4). Embora o uso de veículo instrumentado seja relativamente comum em diversos tipos de pesquisa na área da Engenharia de Tráfego, sua aplicação específica para a coleta de dados da velocidade em trecho não foi localizada na literatura pesquisada. No entanto, no caso de rodovias, onde as velocidades praticadas são elevadas e nem sempre é possível dispor de locais de observação discretos o suficiente para que a presença do pesquisador não interfira no comportamento dos motoristas, essa alternativa torna-se bastante interessante. Ela também é recomendável sempre que a rodovia não oferecer, em função das características do seu acostamento e área lindeira, locais junto aos pontos extremos de cada trecho que ofereçam segurança à integridade física dos pesquisadores envolvidos na coleta de dados. Esse método foi utilizado por Wang *et al.* (2004) e Rakha *et al.* (2007).

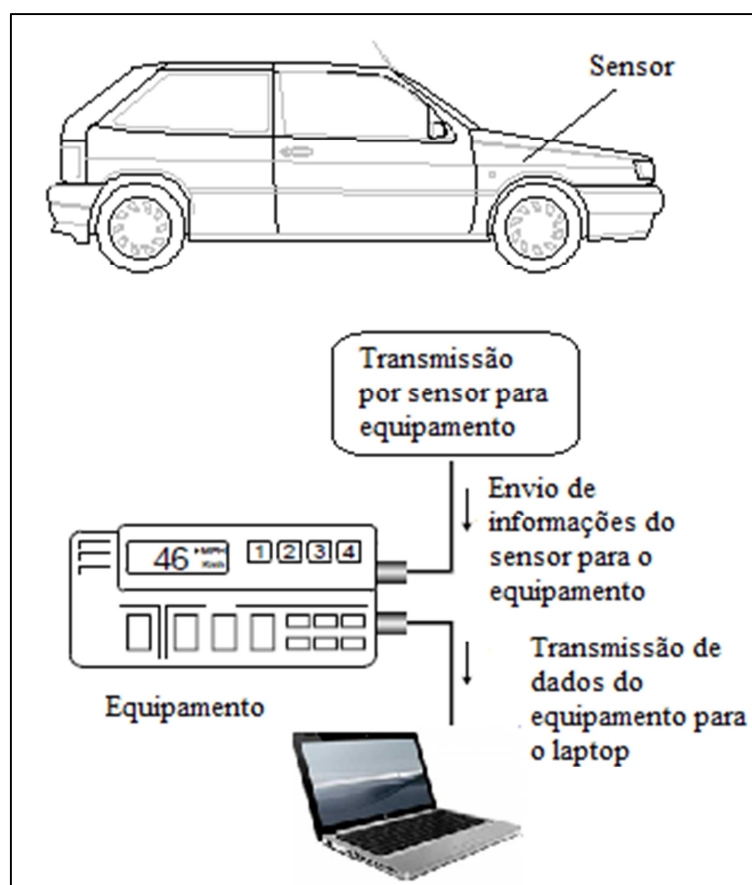


Figura 5.4: Ilustração de um sistema de coleta de dados pelo Método do veículo instrumentado. Adaptado de FHWA, 1998.

Um recurso que vem sendo utilizado para a coleta de dados de comportamento de condutores e velocidade veicular ao longo de trechos são os simuladores veiculares. Estes procuram reproduzir em ambiente virtual as características da via e ambiente viário e permitem que condutores operem um veículo instrumentado de acordo com os estímulos oferecidos pela via/ambiente.

Bella e D'Agostini (2010) realizou sua pesquisa com uso de um simulador para obter a velocidade operacional. A Figura 5.5, mostra os computadores utilizados no trabalho de Bella e D'Agostini (2010), para o desenvolvimento dos cenários viários, e um teste aplicado a um motorista no simulador.

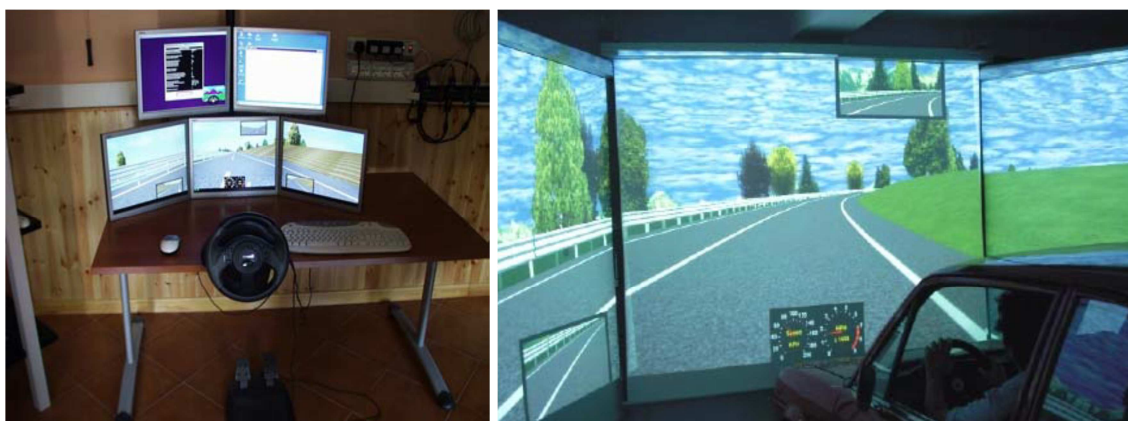


Figura 5.5: Simulador utilizado no trabalho desenvolvido por Bella e D'Agostini (2010)

5.5 QUINTA ETAPA: ANÁLISE DE DADOS

Esta etapa está subdividida em duas partes, a saber:

Parte 1: Análise preliminar

a) Elaboração do Perfil de Velocidade

Os perfis de velocidade permitem avaliar a variação da velocidade (média, V_{85} ou ambas) dentro de cada trecho. Essa avaliação permite verificar se a velocidade sofre variações bruscas quando o veículo passa de um segmento homogêneo para outro dentro do trecho (por exemplo, passa de uma tangente para uma curva horizontal). Isto é, quando analisado em conjunto com o projeto do alinhamento horizontal e vertical do

trecho, é um instrumento útil para análise da consistência geométrica do traçado dentro do trecho considerado.

Destaca-se, entretanto, que ele só pode ser elaborado se o estudo for feito com dispositivos que permitam o registro da velocidade de cada veículo em pontos situados ao longo de sua trajetória, entre os pontos inicial e final do trecho. É o caso, por exemplo, da coleta de dados com veículo instrumentado ou por meio de simuladores.

Como exemplo, foi elaborado um perfil de velocidade para um conjunto hipotético de motoristas, apresentado na Figura 5.6. Este perfil corresponde a um trecho com extensão de 1050 metros, para o qual o equipamento coletou dados de velocidade instantânea para cada motorista em intervalos de 50 metros.

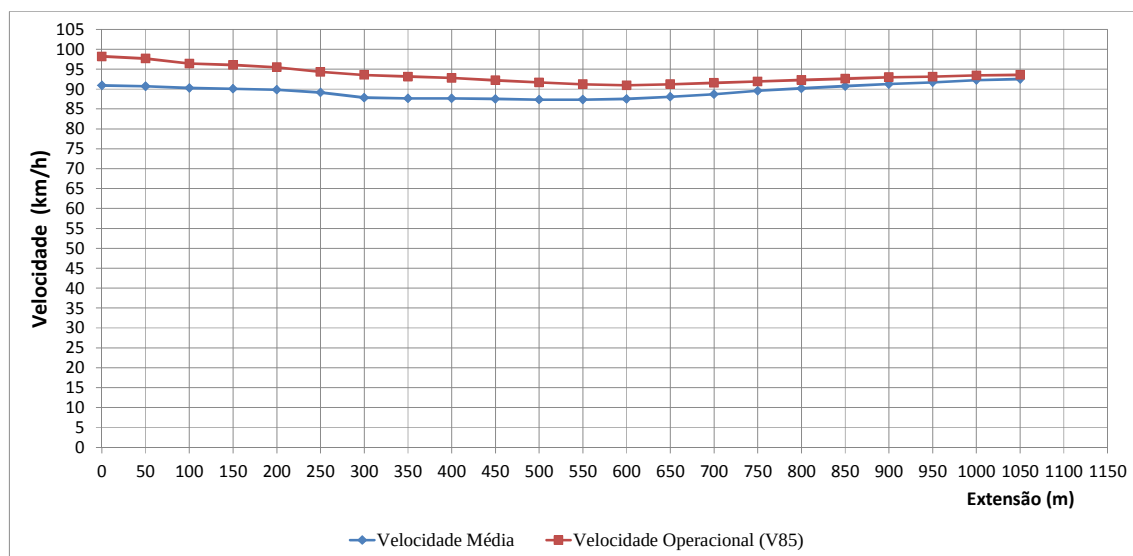


Figura 5.6: Perfil de velocidade média e velocidade operacional

b) Comparação entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto

A comparação entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto se dará graficamente de modo a possibilitar identificar diferenças dessas velocidades em cada trecho considerado no estudo, levando em conta o sentido da circulação.

Parte 2: Estudo da velocidade operacional com relação às características dos trechos

Esta parte da etapa de dados compreende os estudos da relação entre a V_{85} e as variáveis explicativas e a elaboração de modelos de previsão.

a) Estudo das variáveis que representam as características de cada trecho na relação com a V_{85}

Este estudo compreende, inicialmente, a identificação das variáveis, dentre as referidas na Tabela 5.1, que apresentam correlação estatisticamente significativa (para o nível de significância desejado) com a velocidade operacional medida nos trechos (ou trechos-sentido) considerados. Isto é, procura verificar quais variáveis são necessárias e suficientes para explicar a variação observada na V_{85} entre os trechos integrantes da amostra. Um aspecto importante dessa análise é identificar, também, as correlações existentes entre as variáveis explicativas. Essas correlações precisam ser devidamente identificadas para efeito da definição da forma funcional do modelo de previsão.

b) Elaboração de Modelos de Previsão

A partir dos resultados do estudo referido em “a”, pode-se partir para a definição de uma forma funcional para relacionar a V_{85} com as variáveis explicativas cujos valores foram determinados para cada trecho, ou trecho-sentido.

Para tanto, é importante que a base original de dados seja desmembrada em duas. A primeira, contendo o maior número de elementos, será utilizada para a elaboração do modelo. A segunda será empregada para o processo de validação do modelo.

Na avaliação da qualidade de um modelo para estimar a V_{85} em trechos com características compatíveis com as dos integrantes da amostra, deve ser verificado: (i) se as variáveis são estatisticamente significativas para o nível de significância desejado; (ii) se os resíduos, diferença entre os valores estimados e os observados, são aleatórios; e (iii) o valor do coeficiente de determinação do modelo (R^2).

Para efeito da validação do modelo, a equação é aplicada para os trechos (ou trechos-segmentos) que não foram considerados no processo de calibração, e o valor da V_{85} é então estimado para esses trechos. Da comparação entre o valor estimado e o valor medido da V_{85} pode-se determinar se o modelo é ou não válido para a utilização pretendida.

6. CAPÍTULO

ESTUDO DE CASO: RODOVIA DF-250

A aplicação do método proposto, apresentado no Capítulo 5, é essencial para que sejam atingidos os objetivos deste trabalho. Sua aplicação à rodovia DF-250, objeto do presente capítulo, visa permitir o estudo da velocidade operacional em trechos viários com base nas características geométricas dos segmentos homogêneos que os constituem, as quais são representadas por meio de índices que refletem as condições gerais do alinhamento horizontal e vertical do trecho, e fazer uma análise crítica da velocidade operacional com relação à velocidade de projeto em cada trecho.

6.1 PRIMEIRA ETAPA: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA

A rodovia selecionada para realização do estudo de caso foi a rodovia DF-250, inserida em área rural e em região ondulada. Foram considerados somente trechos em pista simples e sem sistema de fiscalização eletrônica ao longo de toda extensão. Por questões de ordem prática optou-se pela rodovia DF-250 para o desenvolvimento deste estudo, na extensão situada entre os cruzamentos com a DF-130 e a DF-100, uma vez que foi possível conseguir junto ao Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal os projetos geométricos em planta e em perfil da mesma.

O mapa de localização mostrado na Figura 6.1 traz a inserção da DF-250 no Distrito Federal, bem como a indicação da extensão da rodovia objeto de análise.

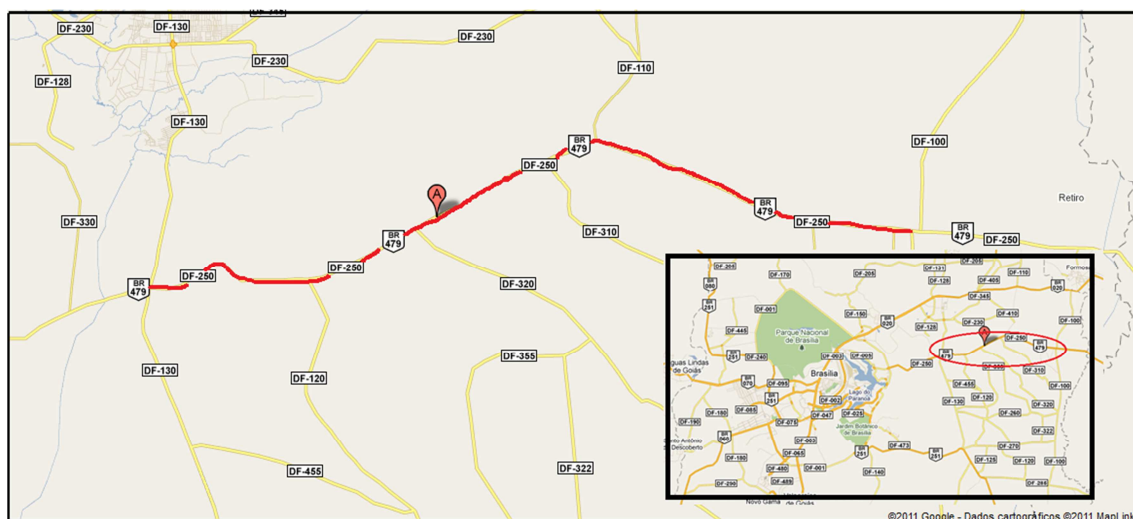


Figura 6.1: Mapa de localização da extensão da DF-250 em Estudo (Google Map, 2011)

Definida a rodovia, partiu-se para a caracterização da mesma quanto à geometria. Para isso, foram obtidos junto ao Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF) os projetos em planta e em perfil da rodovia selecionada, em formato “pdf”. Com o projeto geométrico foi possível obter as principais características do alinhamento horizontal, vertical e da seção transversal (ver Tabela 6.1), bem como a velocidade de projeto.

Tabela 6.1: Principais Características do Alinhamento Horizontal, Vertical e da Seção Transversal.

Principais Características	
Alinhamento Horizontal	Raios variando entre 429,55 a 1150,00 (m)
Alinhamento Vertical	Declividade longitudinal máxima de 7% Declividade longitudinal mínima de 0,115%
Seção Transversal	Largura da pista de rolamento 3,5m Largura do Acostamento 1,0m

Apesar de constar no projeto original acostamento com 1m, em visitas a campo foi possível perceber que em muitos trechos esse acostamento apresentava dimensão menor que 1m e em outros trechos nem existia.

Em visitas à extensão da rodovia utilizada no estudo de caso, e durante a coleta de dados, pode-se verificar que a sinalização existente indica velocidade limite igual a

80km/h. Na documentação disponibilizada pelo DER-DF verificou-se que a velocidade de projeto também é igual a 80km/h.

6.2 SEGUNDA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO

No projeto geométrico foram demarcados trechos formados por um ou mais segmentos homogêneos. Os trechos tiveram comprimentos variando de 805m a 1101,71m. Foram definidos 25 trechos, cada trecho com dois sentidos (sentido 1 e 2), totalizando 50 trechos-sentidos (ver Figura 6.2). Na definição desses trechos buscou-se selecionar diferentes combinações de traçados em planta e perfil.

Assim, definidos os trechos em projeto, passou-se ao segundo passo dessa etapa que foi demarcar *in loco* os trechos selecionados. Com o objetivo de realizar tal etapa com segurança e com uma boa margem de precisão, foi solicitado apoio junto ao DER-DF. O órgão decidiu dar apoio operacional e técnico à execução desta etapa da pesquisa e, por meio da sua equipe de topografia, encarregou-se de demarcar em campo os trechos selecionados.

O procedimento utilizado pela equipe de topografia para a demarcação *in loco* dos 50 trechos-sentidos foi realizado em duas fases: a primeira fase com trabalhos no escritório e a segunda com trabalhos em campo. No escritório foi inicialmente lançado na Base Cartográfica Georreferenciada da cidade de Brasília-DF o eixo da pista de rolamento referente à extensão da rodovia utilizada para este estudo. Posteriormente, foram demarcados os trechos definidos no projeto geométrico e, por fim, definidos pontos de referência (exemplo: interseções, acessos, etc.) com coordenadas conhecidas.

Finalizado os trabalhos no escritório, foram levadas a campo as coordenadas dos pontos de referência, e a partir deles marcados, os pontos de início e término de cada trecho, no pavimento (nos dois sentidos da pista de rolamento da rodovia) como apresentado na Figura 6.3.

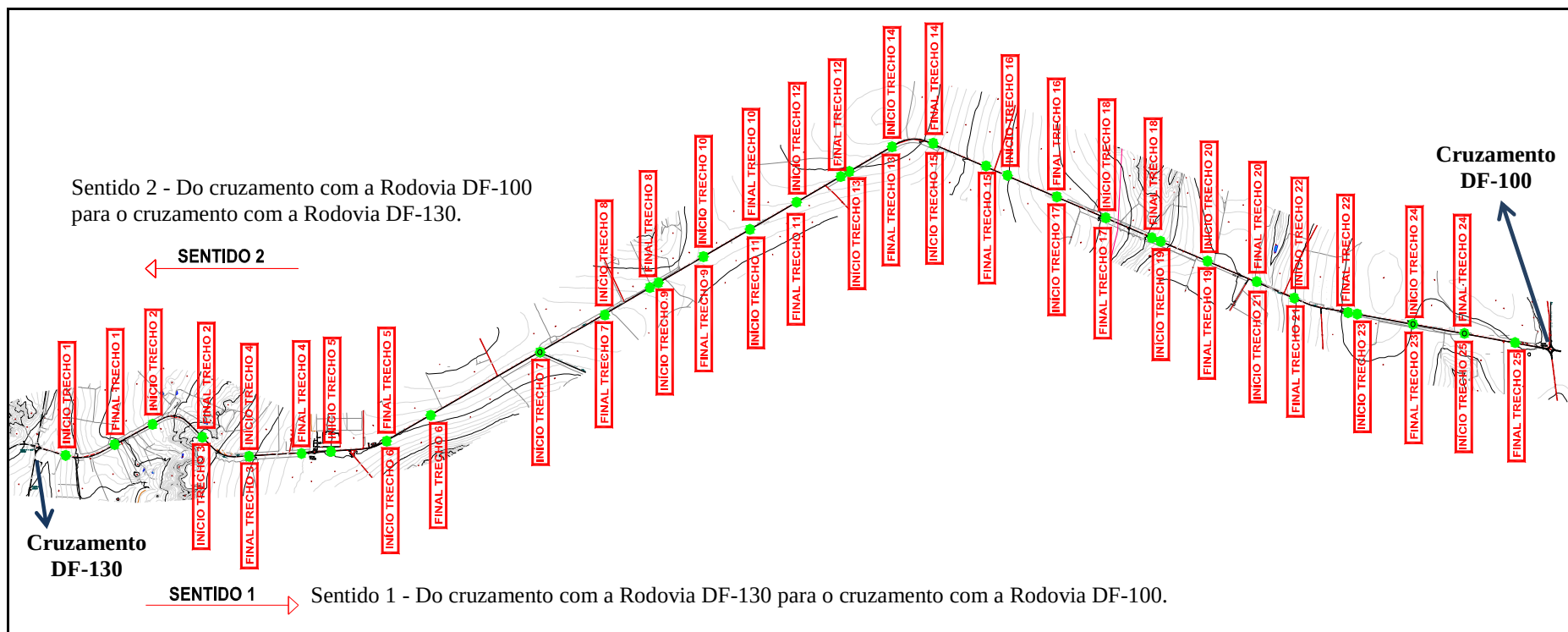


Figura 6.2: Croqui dos 25 trechos selecionados para a pesquisa e cada trecho com dois sentidos (sentido 1 e 2)



Figura 6.3: Exemplo da demarcação dos pontos de início e fim de cada trecho.

6.3 TERCEIRA ETAPA: DESCRIÇÃO DOS TRECHOS DE ESTUDO

De forma a associar os dados a serem coletados para a V_{85} às características dos trechos em estudo, foi realizada a determinação dos valores das variáveis que descrevem as características de cada trecho. Essa atividade consistiu em: determinação dos índices agregados de geometria, levantamento do tipo e densidade da ocupação lindeira e densidade dos pontos de acessos e interseções.

(i) Determinação dos índices agregados de geometria

A partir dos trechos definidos na segunda etapa, e com base nos projetos em planta e perfil da extensão selecionada da rodovia DF-250, foram determinados para cada trecho os índices agregados de geometria: FT_iH , $AVGR$, $FT_iV_{asc.}$ e $FT_iV_{des.}$, $S_{(planta)}$, $S_{(perfil)}$ e $VAVGK$. As expressões para a determinação desses índices foram apresentadas no Capítulo 5.

(ii) Levantamento do tipo e densidade da ocupação lindeira

Para o levantamento do tipo e densidade da ocupação lindeira foi inicialmente observada em imagens de satélite do programa *Google Earth* e para alguns trechos foram feitas observações *in loco*.

(iii) Densidade de pontos de acessos e interseções

Em nenhum trecho existe interseção da rodovia com outras rodovias pavimentadas. Assim, para efeito da análise, as interseções observadas (com rodovias vicinais pavimentadas e baixo volume de tráfego) foram consideradas em conjunto com os acessos, ou seja, foram somados os números de acessos e de interseções, e essa soma foi dividida pela extensão do trecho, dada em quilômetros.

Os resultados obtidos nesta etapa estão sintetizados nas Tabelas 6.2 e 6.3, para efeito de análise no Capítulo 7.

Tabela 6.2: Síntese dos dados de descrição dos trechos de estudo para sentido 1.

TRECHO - SENTIDO	ÍNDICES AGREGADOS DE GEOMETRIA							TIPO E DENSIDADE DA OCUPAÇÃO LINDEIRA	DENSIDADE DE PONTOS DE INTERSEÇÕES E ACESSOS
	Alinhamento Horizontal			Alinhamento Vertical					
	S _{planta}	FTiH	AVG R	VAVGK	FT _i V _(ascendente)	FT _i V _(descendente)	S _{perfil}		
Trecho 1-1	40.535	0.303	985.00	215.385	1564.000	0.000	2.600	semi-urbana	4.000
Trecho 2-1	61.383	0.649	429.55	112.000	5618.720	0.000	2.269	rural	1.815
Trecho 3-1	44.947	0.529	600.00	126.512	2167.894	0.000	4.650	rural	0.000
Trecho 4-1	0.000	1.000	10000.00	376.471	1573.852	0.000	0.850	rural	2.000
Trecho 5-1	22.049	0.557	1150.00	681.403	12.000	119.400	0.916	rural	1.835
Trecho 6-1	0.000	1.000	10000.00	138.600	936.814	0.000	1.443	rural	1.000
Trecho 7-1	0.000	1.000	10000.00	566.667	180.000	0.000	1.200	rural	0.000
Trecho 8-1	0.000	1.000	10000.00	1332.346	0.000	529.000	0.409	rural	2.727
Trecho 9-1	0.000	1.000	10000.00	338.792	86.000	138.000	1.650	rural	2.000
Trecho 10-1	0.000	1.000	10000.00	3529.412	152.400	0.000	0.170	rural	0.000
Trecho 11-1	0.000	1.000	10000.00	2962.963	114.600	0.000	0.270	rural	2.000
Trecho 12-1	0.000	1.000	10000.00	800.000	400.000	0.000	0.500	rural	2.000
Trecho 13-1	0.000	1.000	10000.00	666.667	636.000	0.000	0.600	rural	0.000
Trecho 14-1	59.753	0.270	700.00	148.571	50.000	540.000	4.375	rural	1.250
Trecho 15-1	0.000	1.000	10000.00	4000.000	0.000	235.000	0.231	rural	1.852
Trecho 16-1	0.000	1.000	10000.00	205.181	0.000	1143.000	1.950	rural	0.000
Trecho 17-1	0.000	1.000	10000.00	100.000	0.000	704.000	2.400	rural	2.000
Trecho 18-1	0.000	1.000	10000.00	71.429	0.000	4408.000	2.800	rural	1.000
Trecho 19-1	0.000	1.000	10000.00	84.164	0.000	1908.000	5.300	rural	3.000
Trecho 20-1	0.000	1.000	10000.00	1057.714	0.000	280.000	2.000	rural	2.000
Trecho 21-1	0.000	1.000	10000.00	48.276	1178.000	540.000	6.744	rural	3.488
Trecho 22-1	11.450	0.800	1000.00	1025.000	342.000	0.000	1.100	rural	1.000
Trecho 23-1	0.000	1.000	10000.00	176.032	40.000	140.000	4.629	rural	1.852
Trecho 24-1	0.000	1.000	10000.00	76.712	221.000	840.000	3.650	rural	2.000
Trecho 25-1	0.000	1.000	10000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	rural	3.061

Tabela 6.3: Síntese dos dados de descrição dos trechos de estudo para o sentido 2.

TRECHO - SENTIDO	ÍNDICES AGREGADOS DE GEOMETRIA							TIPO E DENSIDADE DA OCUPAÇÃO LINDEIRA	DENSIDADE DE PONTOS DE INTERSEÇÕES E ACESSOS
	Alinhamento Horizontal			Alinhamento Vertical					
	S _{planta}	FT _{iH}	AVG R	VAVGK	FT _{iV} (ascendente)	FT _{iV} (descendente)	S _{perfil}		
Trecho 1-2	40.535	0.303	985.00	215.385	0.000	1564.000	2.600	semi-urbana	4.000
Trecho 2-2	61.383	0.649	429.55	112.000	0.000	5618.720	2.269	rural	1.815
Trecho 3-2	44.947	0.529	600.00	126.512	0.000	2167.894	4.650	rural	0.000
Trecho 4-2	0.000	1.000	10000.00	376.471	0.000	1573.852	0.850	rural	2.000
Trecho 5-2	22.049	0.557	1150.00	681.403	119.400	12.000	0.916	rural	1.835
Trecho 6-2	0.000	1.000	10000.00	138.600	0.000	936.814	1.443	rural	1.000
Trecho 7-2	0.000	1.000	10000.00	566.667	0.000	180.000	1.200	rural	0.000
Trecho 8-2	0.000	1.000	10000.00	1332.346	529.000	0.000	0.409	rural	2.727
Trecho 9-2	0.000	1.000	10000.00	338.792	138.000	86.000	1.650	rural	2.000
Trecho 10-2	0.000	1.000	10000.00	3529.412	0.000	152.400	0.170	rural	0.000
Trecho 11-2	0.000	1.000	10000.00	2962.963	0.000	114.600	0.270	rural	2.000
Trecho 12-2	0.000	1.000	10000.00	800.000	0.000	400.000	0.500	rural	2.000
Trecho 13-2	0.000	1.000	10000.00	666.667	0.000	636.000	0.600	rural	0.000
Trecho 14-2	59.753	0.270	700.00	148.571	540.000	50.000	4.375	rural	1.250
Trecho 15-2	0.000	1.000	10000.00	4000.000	235.000	0.000	0.231	rural	1.852
Trecho 16-2	0.000	1.000	10000.00	205.181	0.000	0.000	1.950	rural	0.000
Trecho 17-2	0.000	1.000	10000.00	100.000	704.000	0.000	2.400	rural	2.000
Trecho 18-2	0.000	1.000	10000.00	71.429	4408.000	0.000	2.800	rural	1.000
Trecho 19-2	0.000	1.000	10000.00	84.164	1908.000	0.000	5.300	rural	3.000
Trecho 20-2	0.000	1.000	10000.00	1057.714	280.000	0.000	2.000	rural	2.000
Trecho 21-2	0.000	1.000	10000.00	48.276	540.000	1178.000	6.744	rural	3.488
Trecho 22-2	11.450	0.800	1000.00	1025.000	0.000	342.000	1.100	rural	1.000
Trecho 23-2	0.000	1.000	10000.00	176.032	140.000	40.000	4.629	rural	1.852
Trecho 24-2	0.000	1.000	10000.00	76.712	840.000	221.000	3.650	rural	2.000
Trecho 25-2	0.000	1.000	10000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	rural	3.061

6.4 QUARTA ETAPA: COLETA DE DADOS DE VELOCIDADE

6.4.1 Tamanho da Amostra

Para a determinação do tamanho da amostra, foi adotada a metodologia do ITE (1994) apresentada no Capítulo 5, que considera a expressão mostrada na Equação 6.1.

$$N = \frac{S^2 K^2 \times (2 + U^2)}{2 \times E^2} \quad (6.1)$$

Foram considerados os valores recomendados no Capítulo 5 para rodovia de pista simples e análise para obtenção do 85º percentil da velocidade. Para um desvio padrão de 8,5km/h, nível de confiança de 95% ($K=1,96$) e uma constante de correlação para 85º percentil ($U=1,04$) e erro igual a 4km/h, dentro do intervalo recomendado pelo ITE (1994) que varia entre $\pm 1,0$ mph e ± 5 mph (1,61km/h e 8,05km/h), obteve-se um tamanho da mínimo da amostra de 27.

A partir dessa definição foram selecionados 27 motoristas-teste que percorreram os trechos estudados nos dois sentidos, com velocidade por eles considerada como segura e confortável. Ao longo da coleta de dados o pesquisador registrou situações que caracterizavam adoção de velocidade diferente da que seria normalmente adotada pelo condutor (por exemplo, reação a situações inesperadas como veículo trafegando na contra-mão). As medidas de velocidade obtidas nessas situações foram então excluídas no processo de cálculo da velocidade média e da V_{85} do trecho-sentido. Por essa razão, para alguns sentidos de alguns trechos o número de observações acabou sendo inferior a 27.

(i) Análise geral da velocidade média (V_{me}) obtida em cada trecho, por sentido

Com o objetivo de verificar se a velocidade deveria ser estudada de forma agregada por trecho ou se deveria ser considerada em separado por sentido, foi realizado o teste de hipótese de que a diferença entre as médias das velocidades nos dois sentidos (μ_1 e μ_2) é igual a zero, ou seja, de que de que elas são iguais. Este teste foi possível porque as observações nos dois sentidos são pareadas (cada condutor teve sua velocidade medida em cada sentido). Isto é: **Hipótese Nula (H_0):**

$$\mu_1 = \mu_2;$$

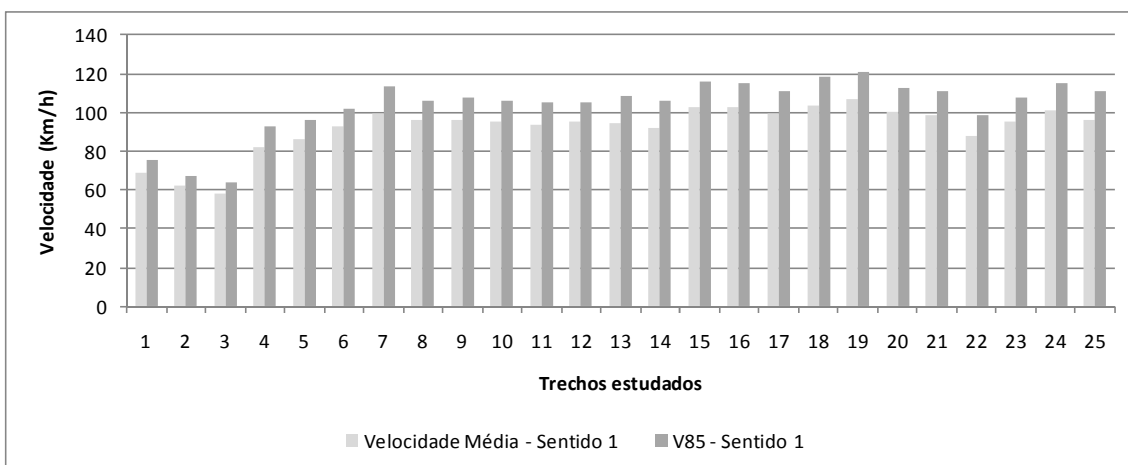
Hipótese Alternativa (H_1):

$$\mu_1 \neq \mu_2.$$

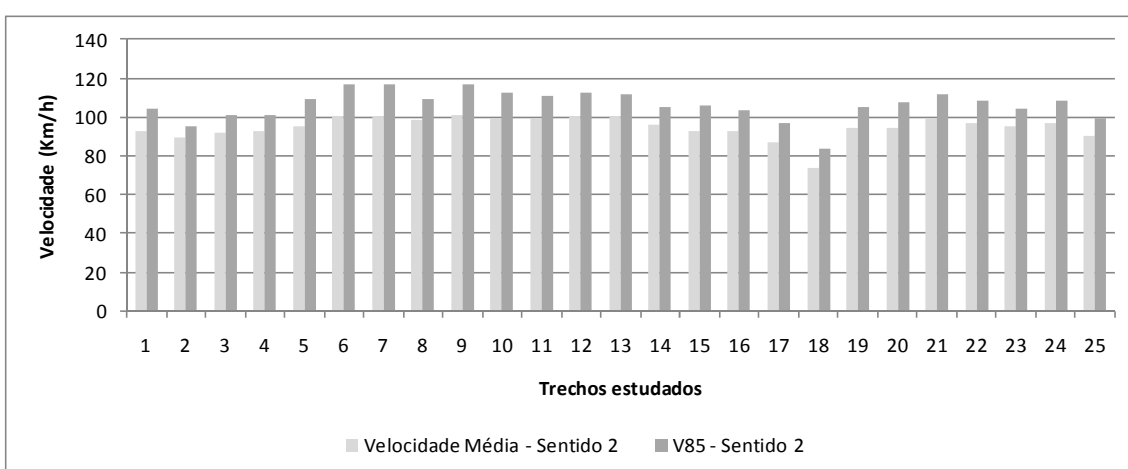
O resultado do teste de hipótese realizado com o auxílio do programa EXCEL produziu os valores-p mostrados na Tabela 6.4. Esses valores correspondem a soma do valor da área bi-caudal da distribuição *t-Student*, correspondente aos valores da estatística “t” maiores que “ $+t_{n-1,\alpha/2}$ ” e menores do que “ $-t_{n-1,\alpha/2}$ ”. Para valores-p menores do que o nível de significância desejado (neste trabalho adota-se $\alpha=0,05$), conclui-se que a diferença entre as médias é significativa. Assim, para os 25 trechos observados, somente em quatro as diferenças da V_{85} nos dois sentidos do mesmo trecho não foram estatisticamente diferentes de zero. Por essa razão, os dados foram tratados por sentido e a base de dados passou a contar com um total de 50 observações (trechos-sentidos). Na Tabela 6.4 também são apresentados os valores obtidos para a velocidade média e velocidade operacional (V_{85}) para cada trecho, por sentido. Essas velocidades são mostradas na Figura 6.4.

Tabela 6.4: Resultado do teste de hipótese referente à igualdade das velocidades médias nos dois sentidos de cada trecho.

Trecho	Valor-p	Velocidade Média (km/h)		V_{85} (km/h)	
		Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
1	0,00000	68,60	92,63	75,67	104,31
2	0,00000	62,43	89,73	66,93	95,39
3	0,00000	58,36	91,74	63,76	101,35
4	0,00000	82,39	92,81	93,04	101,38
5	0,00274	86,07	95,55	96,10	109,63
6	0,00144	93,06	99,88	102,23	117,05
7	0,62764	99,75	100,56	113,74	116,83
8	0,12589	96,10	98,25	105,99	109,29
9	0,00007	95,67	101,30	107,57	116,57
10	0,00294	95,58	99,42	106,29	112,89
11	0,00294	93,94	99,65	105,18	110,91
12	0,00014	95,12	99,98	105,30	112,96
13	0,00001	94,53	99,87	108,12	112,14
14	0,00000	92,28	96,31	106,01	105,50
15	0,00000	102,61	92,93	116,20	106,03
16	0,00000	102,36	92,68	115,08	103,90
17	0,00000	99,33	87,29	110,89	97,02
18	0,00000	103,55	73,78	118,71	83,30
19	0,00000	106,75	94,70	120,96	105,22
20	0,00049	100,07	94,19	112,22	107,88
21	0,58565	98,25	99,06	111,03	111,48
22	0,00000	88,08	97,13	98,52	108,48
23	0,68406	95,24	94,86	107,60	104,61
24	0,00017	101,29	96,66	114,87	108,32
25	0,00001	96,32	90,22	110,94	99,74



(a) Sentido 1



(b) Sentido 2

Figura 6.4: Valores da velocidade média e velocidade operacional em cada trecho

Os resultados da Figura 6.4 mostram que, exceto no sentido 1 dos trechos 1, 2 e 3 e no sentido 2 do trecho 18, a própria velocidade média é superior a velocidade de projeto e velocidade limite da via, ambas iguais a 80km/h. A análise da velocidade operacional é mais detalhada na seção 6.5.

Assim, com os resultados apresentados na Tabela 6.4, pode-se concluir que as médias das velocidades no sentido 1 e no sentido 2 são diferentes entre si, dessa forma os trechos-sentidos podem ser analisados de forma distinta. Outro resultado observado foi que para a maioria dos trechos sentidos apresentaram desvio padrão acima do valor inicialmente adotado de 8,5km/h.

(ii) Análise do erro máximo da velocidade operacional (V_{85}) obtida em cada trecho, por sentido

Com o objetivo de verificar: (i) o impacto da adoção, em alguns casos, de número de observações inferior ao valor inicialmente definido de 27 para cada trecho-sentido; e (ii) o impacto do valor do desvio-padrão estimado a partir dos dados amostrais, foram recalculados os valores dos erros máximos para as velocidades operacionais coletadas neste estudo.

Para tanto, aplicou-se a Equação 6.2, derivada da Equação 6.1, para os mesmos valores de $K = 1,96$ e $U = 1,04$. Considerando os valores efetivos do número de observações em cada trecho-sentido e o desvio-padrão calculado com base nos dados coletados, foram obtidos os valores dos erros máximos (E) mostrados na Tabela 6.5. Esses valores serão posteriormente comparados com o erro inicialmente admitido de 4km/h.

Na Equação 6.2, N será substituído por $N1$ (número de observações no sentido 1) ou $N2$ (número de observações no sentido 2) e S corresponderá a $S1$ ou $S2$ (desvio-padrão do sentido 1 e 2), conforme o sentido considerado.

$$E = \sqrt{\frac{S^2 K^2 \times (2 + U^2)}{2 \times N}} \quad (6.2)$$

Tabela 6.5: Valores do erro para o desvio padrão real e número real de amostras.

Trecho	V ₈₅ (Sentido 1)	S1	N1	E	V ₈₅ (Sentido 2)	S2	N2	E
1	75,67	8,67	26	4,14	104,31	11,06	25	5,38
2	66,93	9,53	25	4,64	95,39	7,97	25	3,88
3	63,76	5,65	21	3,00	101,35	8,74	25	4,25
4	93,04	8,98	23	4,56	101,38	9,61	27	4,50
5	96,10	11,94	24	5,93	109,63	12,37	25	6,02
6	102,23	9,55	25	4,65	117,05	15,13	26	7,22
7	113,74	15,39	26	7,34	116,83	13,18	27	6,17
8	105,99	11,41	27	5,34	109,29	12,33	27	5,77
9	107,57	11,67	27	5,47	116,57	13,88	27	6,50
10	106,29	11,43	27	5,35	112,89	13,83	26	6,60
11	105,18	11,76	26	5,61	110,91	12,16	26	5,80
12	105,30	11,29	27	5,29	112,96	13,13	27	6,15
13	108,12	12,05	27	5,64	112,14	11,62	27	5,44
14	106,01	11,89	26	5,67	105,50	10,17	25	4,95
15	116,20	12,51	27	5,86	106,03	11,68	27	5,47
16	115,08	12,77	27	5,98	103,90	11,11	27	5,20
17	110,89	11,85	27	5,55	97,02	8,63	27	4,04
18	118,71	12,38	27	5,80	83,30	10,17	27	4,76
19	120,96	13,91	27	6,51	105,22	11,97	26	5,71
20	112,22	11,97	27	5,61	107,88	12,78	27	5,98
21	111,03	11,76	27	5,50	111,48	13,49	27	6,32
22	98,52	9,52	27	4,46	108,48	11,74	27	5,50
23	107,60	10,51	27	4,92	104,61	11,90	27	5,57
24	114,87	12,28	26	5,86	108,32	10,76	26	5,13
25	110,94	12,25	25	5,96	99,74	8,60	26	4,11

Por meio da Tabela 6.5, verifica-se que em somente dois casos o desvio-padrão amostral foi inferior ao valor inicialmente adotado de 8,5 km/h. Esse fato, aliado à necessidade de eliminação de algumas observações de velocidade da amostra inicial, fez com que o erro máximo recalculado ultrapassasse o valor desejado de 4 km/h em praticamente todas as situações analisadas (exceto para o trecho 3, sentido 1, e trecho 2, sentido 2). No entanto, em nenhum caso esse erro ficou fora do intervalo de erros admitidos pelo ITE (1994), que é de $\pm 1\text{mph}$ (1,61 km/h) a $\pm 5\text{mph}$ (8,05 km/h).

Com base nesses resultados, e levando em conta as limitações de tempo e recursos da presente pesquisa, considera-se dispensável a ampliação do número de observações em cada trecho por sentido, por meio da realização de novas passagens do veículo instrumentado pelos trechos com a participação de novos motoristas. Isto é, considera-se que as amostras obtidas podem ser utilizadas para dar prosseguimento à análise dos

elementos que afetam a V_{85} . A análise subsequente, portanto, incluirá 50 observações, considerando cada sentido de cada trecho como uma observação distinta.

6.4.2 Coleta de dados de velocidade

Foram coletados dados de velocidade para 27 motoristas voluntários (com idades entre 25 e 51 anos). A composição da amostra de motoristas por gênero (60% homens e 40% mulheres) foi a mesma adotada por Bella (2008) em seu trabalho com veículo instrumentado com uso de um simulador.

(i) Método utilizado na coleta de dados

O método de coleta de dados de velocidade aplicado para esta pesquisa foi o método do veículo-teste instrumentado. Esta escolha deveu-se ao fato do Laboratório de Transporte e Tráfego do PPGT (LABTTTRAF) dispor de um equipamento que permite a coleta automática de dados de distância, tempo de deslocamento e velocidade pontual, a intervalos previamente definidos pelo pesquisador no processo de programação do equipamento. Permite, também, por definição do pesquisador *in loco*, registrar esses dados em pontos específicos do trajeto, permitindo que a razão da seleção do local seja registrada *on-line*. Todos esses dados são salvos pelo equipamento no computador ao qual está conectado, em arquivo próprio pré-nomeado pelo pesquisador, que pode ser exportado para planilha EXCEL para futuro tratamento dos dados.

É importante destacar que não foi encontrada na bibliográfica pesquisada uma orientação específica de coleta de dados da velocidade operacional (V_{85}) para o método do veículo-teste instrumentado. Cada trabalho que utiliza esse método faz adaptações do processo em função das características do local e da disponibilidade de equipamentos para a realização da instrumentação.

(ii) Veículo instrumentado

Inicialmente, foi necessário calibrar o equipamento para o veículo utilizado na pesquisa de forma que o mesmo marcasse corretamente a distância percorrida. O veículo utilizado foi um Fiesta Hatch, 1.0, ano 2011, sendo esse um veículo representativo da frota brasileira, por ser considerado um carro popular. O equipamento é o Odômetro

Trip TOTEM-Modificado, cujas características foram implantadas por solicitação do próprio LABTTTRAF.

O procedimento para calibrar o equipamento para as características do veículo foi realizado de forma simples, seguindo as instruções do “Odômetro Trip TOTEM e Odômetro Trip TOTEM CR - Manual de Instruções” (Bortot M.E., 2008): percorreu-se uma distância conhecida e então foi registrada esta distância ao equipamento, que automaticamente calcula um valor para sua constante de calibração.

O equipamento completo é composto por um sensor eletrônico conectado ao fio que leva o sinal para o velocímetro digital (ver Figura 6.5) e outro ligado à bateria do veículo; esses sensores foram conectados ao equipamento (ver Figura 6.6) e o equipamento, por meio de um cabo de dados (Ver Figura 6.7), foi conectado a um computador portátil. Esse cabo transmite em tempo real dados sobre velocidade instantânea, tempo e distância para o programa instalado no computador portátil. O equipamento foi programado para fazer leitura desses dados de 50 em 50 metros, tomados do ponto inicial de coleta (esse ponto inicial, ponto zero, não foi o ponto inicial do trecho em estudo). Com o auxílio de um controle (ver Figura 6.7) é possível registrar um ponto para leitura instantânea de dados pelo equipamento. No momento em que o controle é acionado o computador abre uma lista de eventos (pré-programados no computador) e o pesquisador pode selecionar o evento que está associado ao referido acionamento; esta informação é registrada pelo equipamento e transferida diretamente para o computador portátil, juntamente com os demais dados referentes ao ponto de acionamento (distância, velocidade e tempo).

No caso da presente pesquisa, o controle foi acionado nos pontos de início e fim de cada trecho, quando a roda dianteira do veículo teste passava pela demarcação feita pelo DER-DF na pista. Foi usado, também, para registrar ao longo de cada levantamento, o início e o final de cada período em que a velocidade do veículo foi afetada por situações estranhas às condições normais da pesquisa. Com base neste último registro foi possível, na fase de tabulação dos dados brutos, excluir o valor medido da velocidade para um determinado motorista nos trechos-sentidos em que ocorreram interferências.



Figura 6.5: Sensor eletrônico



Figura 6.6: Ligação dos sensores com o equipamento



Figura 6.7: Conexão do equipamento ao computador e visualização do controle

(iii) Instruções dadas aos motoristas

Os motoristas participantes desta pesquisa, após familiarizarem-se com o veículo-teste, foram instruídos a dirigir com a velocidade que julgassem mais segura e confortável, tendo em vistas as condições operacionais e geométricas da via. Para a coleta de dados, cada motorista dirigiu nos dois sentidos da via.

(iv) Resultados obtidos

A pesquisa foi realizada em dias de semana e final de semana, em períodos do dia com baixo fluxo de veículos. Não foram realizados levantamentos em períodos de chuva, neblina e nevoa.

Os valores obtidos para a velocidade operacional nos dois sentidos de cada trecho estão apresentados na Tabela 6.5.

6.5 QUINTA ETAPA: ANÁLISE DE DADOS

Parte 1: Análise preliminar

a) Elaboração do Perfil de Velocidade

Conforme apresentado no Capítulo 5, o perfil de velocidade pode ser traçado para cada motorista, ou, dado o interesse do presente estudo, levar em conta medidas representativas das velocidades praticadas por todos os motoristas envolvidos na pesquisa. Nesse caso, devem ser traçados perfis referentes à V_{85} e à $V_{média}$. Estes perfis, relacionam as referidas velocidades com a distância percorrida a partir do início do Trecho 1. Esta distância é obtida pelo equipamento Trip TOTEM modificado a partir do ponto zero estabelecido para cada motorista, o qual antecede em alguns metros o início do Trecho 1.

Assim, para efeito da elaboração do perfil de velocidade instantânea média e V_{85} (quinta etapa do método definido no Capítulo 5), considerando vários condutores e/ou viagens, é importante que o ponto zero do levantamento seja o mesmo para todas as repetições do levantamento, como apresentado na Figura 6.8. Se esse cuidado não for tomado (ver Figura 6.9), os dados de velocidade, tempo e distância obtidos a intervalos regulares para cada viagem, precisarão ser posteriormente tratados com base em uma referência comum (por exemplo, o local definido como o início de um determinado trecho). Na Figura 6.9, por exemplo, os valores de “D” medidos no início do Trecho 1 serão diferentes para cada motorista, fazendo com que as medições a intervalos regulares de 50m, contados a partir da origem, correspondam a pontos distintos ao longo dos trechos analisados (exceto no início e final de cada trecho, onde o registro dos dados é solicitado manualmente pelo pesquisador).

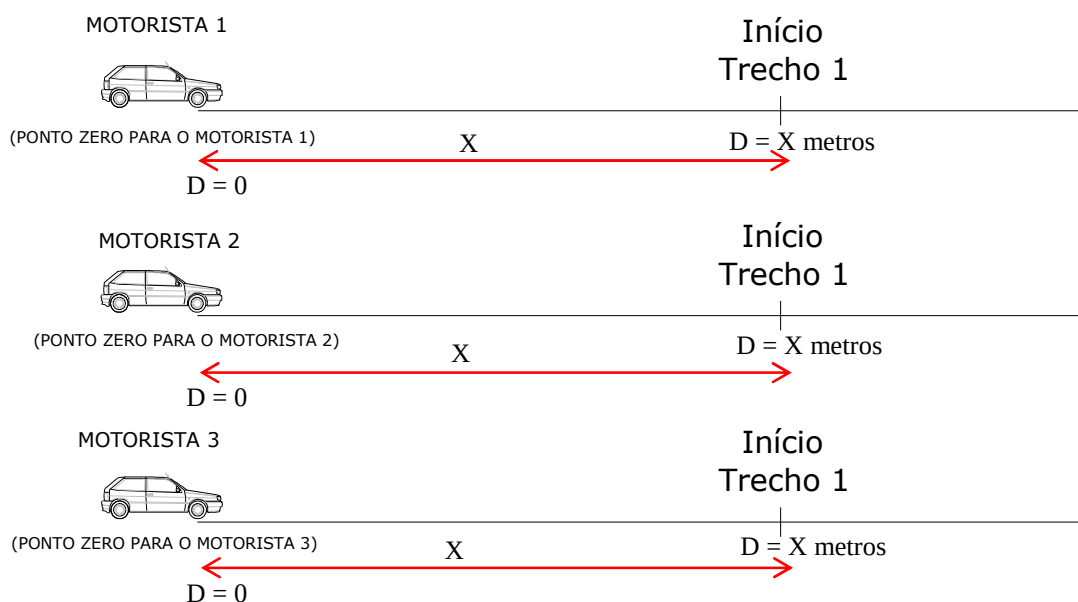


Figura 6.8: Condição para elaboração do perfil de velocidade (Ponto zero para o motorista 1 = Ponto zero para o motorista 2 = Ponto zero para o motorista 3).

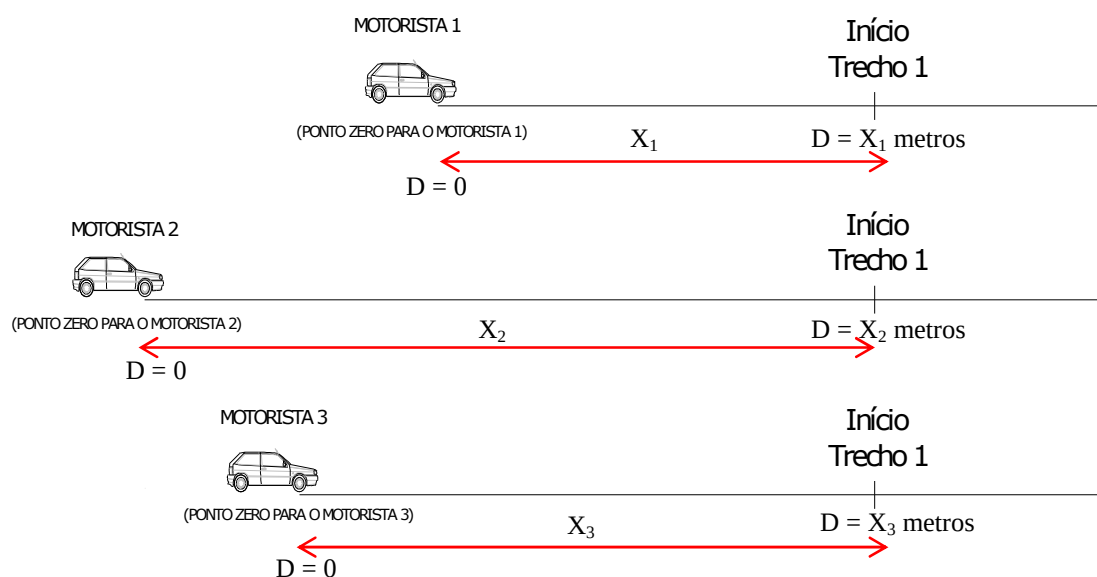


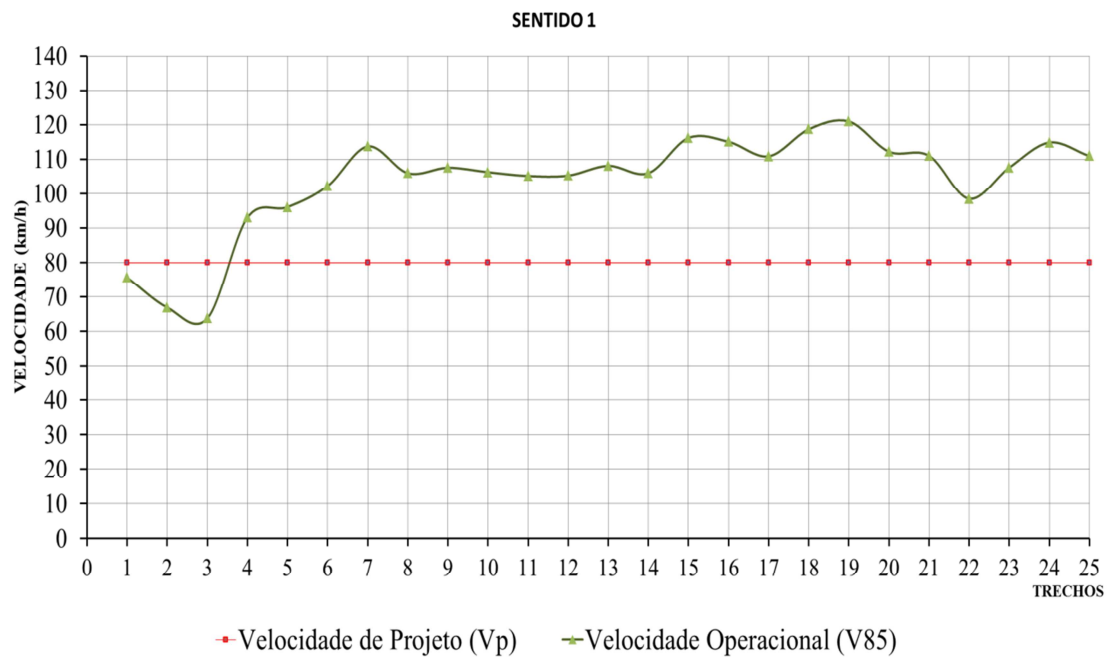
Figura 6.9: Situação observada na presente pesquisa (Ponto zero para o motorista 1 $\neq$ Ponto zero para o motorista 2 $\neq$ Ponto zero para o motorista 3).

No caso da presente pesquisa, devido à dificuldades de ordem prática, não foi adotado o mesmo ponto zero para todos os motoristas. Assim, como para elaboração dos perfis de velocidade os dados coletados precisariam passar por um tratamento demorado, considerando às limitações de tempo para a conclusão do estudo, estes perfis não foram traçados. Por isso, não foi possível estudar a variação da V_{85} dentro de cada trecho.

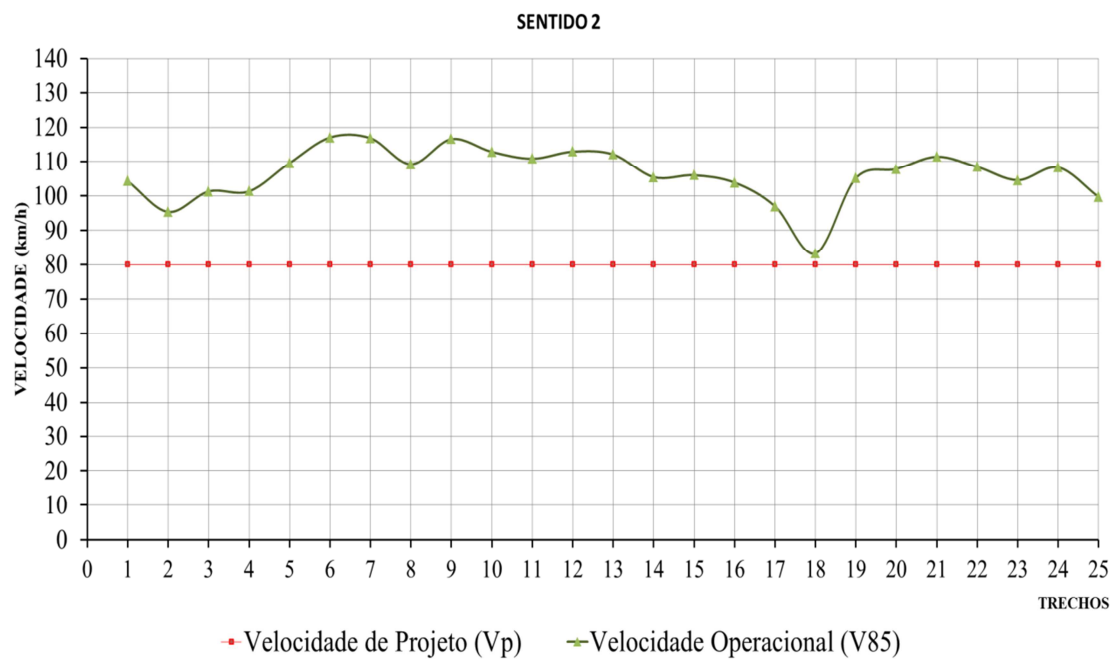
b) Comparação entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto

Como pode ser observado na Figura 6.10, a velocidade operacional só foi menor do que a velocidade de projeto para os trechos 1, 2 e 3, no sentido 1. Para esses trechos há uma associação de condições do alinhamento horizontal e vertical que podem ter contribuído para redução da velocidade operacional. Assim, torna-se necessário que a velocidade limite para esse trecho seja reavaliada pelo DER-DF.

Para os demais trechos, o estudo mostrou que a adoção da velocidade limite como sendo igual à velocidade de projeto não atende a percepção de segurança e conforto dos motoristas. Isto é, caso a ocorrência de acidentes na via, ou outras características operacionais avaliadas pelo DER-DF, recomendem a adoção da velocidade limite igual a 80 km/h, é necessário o uso de estratégias para assegurar o cumprimento dessa velocidade por parte dos motoristas.



(a) Sentido 1



(b) Sentido 2

Figura 6.10: Comparação entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto para os trechos do estudo

Parte 2: Estudo da velocidade operacional com relação às características dos trechos

Conforme apresentado no Capítulo 5, este estudo compreende: (i) análise das variáveis que representam as características de cada trecho, na sua associação com a velocidade operacional; (ii) elaboração de modelo de previsão da velocidade operacional levando em conta as variáveis estudadas.

Dada a importância desta parte da análise dos dados, sua apresentação será feita como um capítulo específica da presente dissertação (Capítulo 7).

6.6 TÓPICOS CONCLUSIVOS

- A aplicação do método proposta no Capítulo 5 mostrou sua adequação aos objetivos da pesquisa. Os resultados obtidos permitiram que um dos objetivos específicos da pesquisa fosse alcançado (comparação entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto), bem como que os dados necessários à consecução dos demais objetivos fossem devidamente coletados e tratados.
- A forma como os dados foram coletados com o veículo teste, sem a utilização de um marco zero comum para as viagens realizadas com todos os motoristas, limitou a aplicação apresentada. Embora com o uso dos pontos de início e fim de cada trecho seja possível determinar a velocidade em pontos comuns para todos os motoristas, essa determinação é trabalhosa. A limitação de tempo para a conclusão da pesquisa fez com que se decidisse fazer essa análise em momento futuro.
- A análise comparativa entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto para todos os trechos estudados mostrou que elas diferem entre si. Enquanto em três trechos-sentidos a velocidade operacional foi inferior à de projeto, nos demais 47 trechos-sentido ela foi bastante superior. Este resultado sugere providências por parte do DER-DF para rever a velocidade limite da via ou para definir medidas que façam com a mesma seja devidamente observada pelos motoristas.

7. CAPÍTULO

ESTUDO DA VELOCIDADE OPERACIONAL COM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS DOS TRECHOS

Os resultados obtidos com o estudo de caso descrito no Capítulo 6 são analisados no presente capítulo. A análise busca identificar, dentre as variáveis explicativas consideradas, aquelas que afetam significativamente a velocidade operacional (V_{85}), para um nível de significância de 5%. Visa, também, verificar a presença de correlação entre as variáveis explicativas consideradas e definir uma relação funcional entre as variáveis significativas e a V_{85} . As diferentes etapas da análise são apresentadas nas seções a seguir.

7.1 Análise inicial das variáveis através do diagrama de dispersão

Inicialmente foi realizada uma análise exploratória da relação entre a variável dependente (V_{85}) e as variáveis independentes (índices agregados de geometria e a densidade de interseções e acessos). Para isso, foram elaborados gráficos de dispersão linear utilizando o software Microsoft Excel 2010, conforme exemplo apresentado na Figura 7.1, para a variável Sinuosidade em Planta (S_{planta}). Os diagramas de dispersão para as demais variáveis são apresentados no Anexo 1.

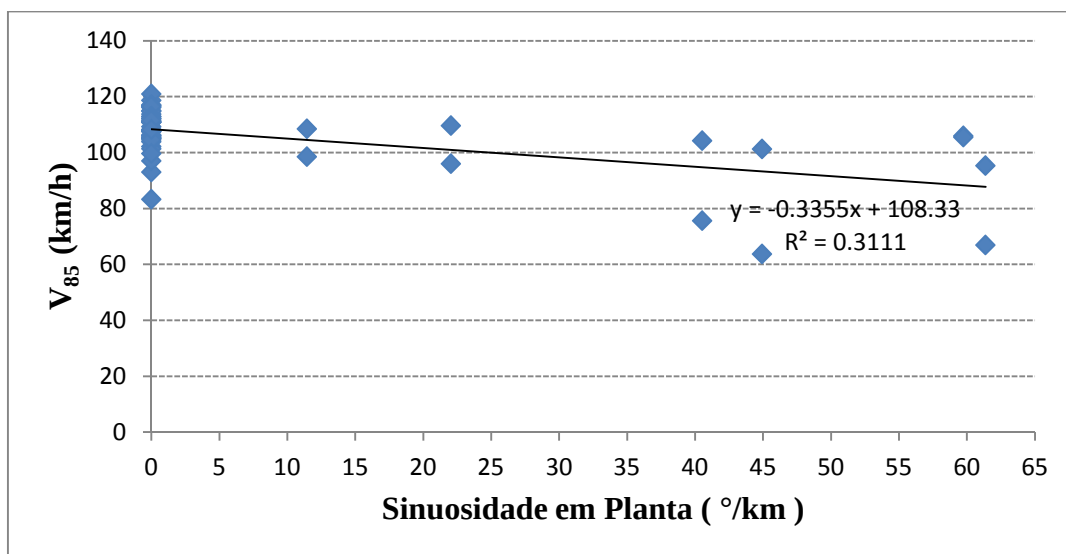


Figura 7.1: Gráfico de Dispersão Linear da V_{85} em função da Sinuosidade em Planta.

Essa análise mostrou que, dentre as variáveis estudadas, somente para a variável independente Fator de Tangente Vertical Ascendente ($FT_i V_{\text{ascendente}}$) a dispersão com tendência linear apresentou coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,5. Para as outras variáveis

7.2 Análise da correlação linear entre V_{85} e as variáveis independentes e destas entre si

Outra análise realizada refere-se à verificação da presença de correlação linear entre a variável dependente (V_{85}) e as variáveis independentes, e destas entre si. O indicador usualmente adotado para medir a correlação entre duas variáveis é o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (r), também conhecido como Coeficiente de Correlação do Momento Produto. No caso da regressão linear, o valor de r corresponde à raiz quadrada do coeficiente de determinação, isto é, é igual a R . Ou seja, a análise realizada em 7.1 já permite verificar a correlação linear entre a V_{85} e cada uma das variáveis independentes. Entretanto, não permite a verificação da correlação das variáveis independentes entre si, o que é feito nesta seção.

Na prática, o coeficiente linear de Pearson amostral (r) é interpretado como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis X e Y , com a forma $Y = \alpha + \beta X$, onde α e β são constantes. O coeficiente de correlação entre X e Y é o mesmo que entre Y e X , e o valor absoluto do coeficiente r não é afetado por qualquer transformação linear de X ou Y .

A interpretação do coeficiente quando $r = 1$ é de que existe correlação linear perfeita entre as variáveis X e Y . A correlação é linear perfeita positiva quando $r = 1$ e linear perfeita negativa quando $r = -1$. Quando se tem $r = 0$, não existe correlação linear entre as variáveis X e Y . Segundo Santos (2003), o coeficiente de correlação pode ser avaliado qualitativamente segundo a Tabela 7.1

Tabela 7.1: Avaliação qualitativa do Coeficiente de Pearson.

Coeficiente de correlação	Classificação Correlação
$r = 1$	Perfeita positiva
$0.8 \leq r < 1$	Forte positiva
$0.5 \leq r < 0.8$	Moderada positiva
$0.1 \leq r < 0.5$	Fraca positiva
$0 < r < 0.1$	Ínfima positiva
0	Nula
$-0.1 < r < 0$	Ínfima negativa
$-0.5 < r \leq -0.1$	Fraca negativa
$-0.8 < r \leq -0.5$	Moderada negativa
$-1 < r \leq -0.8$	Forte negativa
$r = -1$	Perfeita negativa

Fonte: Santos (2003)

A Tabela 7.2 apresenta os resultados da matriz dos coeficientes de correlação de Pearson, obtidos com o auxílio do programa estatístico SYSTAT, versão 10.1, para todas as variáveis consideradas neste estudo.

Tabela 7.2: Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson.

Variável	$S_{(planta)}$	FTiH	AVGR	VAVGK	$FT_iV_{(asc)}$	$FT_iV_{(desc)}$	$S_{(perfil)}$	Densidade	V_{85}
$S_{(planta)}$	1.000								
FTiH	-0.910	1.000							
AVGR	-0.896	0.914	1.000						
VAVGK	-0.256	0.234	0.215	1.000					
$FT_iV_{(asc)}$	0.287	-0.131	-0.189	-0.232	1.000				
$FT_iV_{(desc)}$	0.275	-0.119	-0.177	-0.244	-0.225	1.000			
$S_{(perfil)}$	0.263	-0.232	-0.155	-0.582	0.203	0.200	1.000		
Densidade	0.023	-0.114	-0.011	-0.124	0.076	0.043	0.302	1.000	
V_{85}	-0.563	0.47	0.537	0.194	-0.738	0.141	-0.099	-0.033	1.000

Dentre todas as variáveis consideradas, a variável FT_iV_{asc} . (Fator de Tangente Vertical Ascendente) foi a que apresentou maior coeficiente de correlação com a V_{85} (-0,738), caracterizando-se em uma correlação moderada negativa, tendendo a forte. As variáveis referentes ao alinhamento horizontal ($S_{(planta)}$, FT_iH e AVGR) apresentaram correlações moderadas, negativa e positiva, respectivamente, ou, no caso da FT_iH , fraca e positiva, tendendo a moderada, em relação a V_{85} .

Outro resultado importante extraído da matriz de correlação apresentada na Tabela 7.2, foi a identificação de algumas correlações estatisticamente significativas existentes entre as variáveis independentes. Sendo essas: $S_{(planta)}$ com FT_iH (-0,910), AVGR com FT_iH (0,914), AVGR com $S_{(planta)}$ (-0,896) e $S_{(perfil)}$ com VAVGK (-0,582).

Esses resultados do estudo da correlação são importantes para a próxima fase do tratamento dos dados, onde o propósito é verificar quais as variáveis independentes que afetam a V_{85} quando consideradas em conjunto.

7.3 Estudo da relação linear entre a V_{85} e as variáveis independentes consideradas

Com o objetivo de identificar as variáveis que melhor explicam a V_{85} , quando consideradas em conjunto, e obter modelos de previsão da V_{85} para a rodovia estudada (seção 7.4), utilizou-se a regressão linear múltipla.

Inicialmente foi gerado um modelo linear utilizando todas as variáveis independentes e a variável dependente (V_{85}). No entanto, no modelo gerado algumas variáveis independentes não apresentaram resultados estatisticamente significativos para nível de significância de 5%, ou seja, algumas variáveis apresentaram valores de “ $p > 0,05$ ”, o que já era esperado a partir da análise apresentada na seção 7.2. Sendo assim, um processo de retirada dessas variáveis foi realizado. Cada variável foi sendo retirada do modelo respeitando a ordem decrescente do valor de “ p ”, até que se chegasse a um modelo em que todas as variáveis fossem estatisticamente significativas (“ $p < 0,05$ ”). Pela Tabela 7.3 verifica-se que o melhor modelo é o 7, cuja expressão é mostrada na Equação 7.1.

Todos os modelos gerados apresentaram p igual a 0.000, ou seja, são estatisticamente significativos.

Embora as variáveis já tenham sido apresentadas é importante apresentar seus intervalos para a rodovia estudada, que são:

- FT_iH : intervalo variando entre 0,27 a 1,00 (km/km);
- AVGR: intervalo entre 429,55 a 1150,00 (m);

- $FT_iV_{asc.}$ e $FT_iV_{des.}$: intervalo entre 0 e 5618,72 (%×m);
- $S_{(planta)}$: intervalo entre 0 e 61,383 (°/km);
- $S_{(perfil)}$: intervalo entre 0 e 6,74 (%/km)
- Densidade de pontos de acessos e interseções: 0 a 4 (número de acessos e interseções/km); e
- VAVGK: intervalo de 0 a 4000,00 (m/%)

No caso da variável AVGR, para permitir sua devida consideração no processo de modelagem nos casos dos trechos sem curvas horizontais (seu valor seria infinito), atribui-se a ela valor igual a 10.000,00 m.

Tabela 7.3: Resumo dos modelos lineares usados para identificar as variáveis intervenientes na V_{85} para a rodovia estudada.

CONSTANTES E LISTA DE VARIÁVEIS	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3		MODELO 4		MODELO 5		MODELO 6		MODELO 7	
	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p	Coeficiente	Valor-p
Constante	101.617	0.000	100.384	0.000	100.169	0.000	100.578	0.000	97.024	0.000	97.505	0.000	99.490	0.000
$S_{(planta)}$	-0.102	0.573	-0.090	0.490	-0.088	0.491	-0.096	0.445						
FTIH	-1.589	0.921												
AVGR	0.001	0.177	0.001	0.129	0.001	0.121	0.001	0.126	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
VA VGK	0.000	0.766	0.000	0.773	0.000	0.779								
$FT_i V_{(ascendente)}$	-0.007	0.000	-0.007	0.000	-0.007	0.000	-0.007	0.000	-0.007	0.000	-0.007	0.000	-0.007	0.000
$FT_i V_{(descendente)}$	0.001	0.483	0.001	0.440	0.001	0.438	0.001	0.412	0.001	0.54				
$S_{(perfil)}$	0.821	0.272	0.824	0.264	0.790	0.258	0.796	0.166	0.727	0.198	0.814	0.134		
Densidade	-0.192	0.854	-0.156	0.871										
R ² Ajustado	0.668		0.676		0.684		0.678		0.681		0.686		0.677	
Valor de "p" para o Modelo	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	

$$\text{Modelo 7: } 99,490 + 0,001 \times AVGR - 0,007 \times FT_i V_{(ascendente)} \quad (7.1)$$

Para a rodovia estudada o Modelo 7 teve como resultado de R^2 ajustado um valor de 0,677, o que mostra que ele explica 67,7% da variação observada na variável V_{85} . Além disso, o modelo obtido (ver Equação 7.1) é estatisticamente significativo para $\alpha=0,05$, as variáveis independentes não são correlacionadas entre si e os resíduos são aleatórios (ver Figura 7.2).

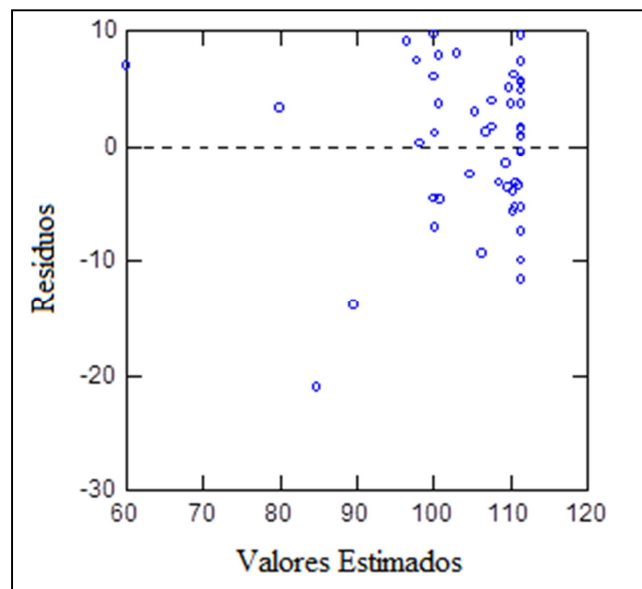


Figura 7.2: Gráfico de Resíduos para o Modelo 7

As duas variáveis do Modelo 7 estão entre aquelas que a análise efetuada em 7.2 mostrou apresentarem, quando consideradas de modo isolado, os maiores valores de correlação com a V_{85} .

Como as três variáveis representativas das condições do trecho em planta ($S_{(planta)}$, FT_iH e $AVGR$) apresentaram valores próximos para os coeficiente de correlação com a V_{85} , são altamente correlacionadas entre si, e o critério adotado para a eliminação gradual das variáveis não significativas dos modelos apresentados na Tabela 7.3 pode ser alterado, é oportuno verificar o desempenho de modelos alternativos onde a variável selecionada para representar o perfil do trecho ($FT_iV_{ascendente}$) seja associada também às variáveis S_{planta} e FT_iH . As características dos modelos obtidos, juntamente com as do Modelo 7, são mostradas na Tabela 7.4.

Tabela 7.4: Resumo dos modelos adicionais estudados para a base de dados completa.

Constante e Lista de Variáveis	Modelo 7		Modelo 8		Modelo 9	
	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p
Constante	99,490	0,000	110,753	0,000	92,010	0,000
FTiV _(ascendente)	-0,007	0,000	-0,007	0,000	-0,007	0,000
AVGR	0,001	0,000				
S _(planta)			-0,226	0,000		
FTiH					19,113	0,000
R ² Ajustado	0,677		0,649		0,655	
Valor de “p” para o modelo	0,000		0,000		0,000	

Os dados da Tabela 7.4 confirmam que o Modelo 7 possui R² apenas um pouco superior ao obtido pelos Modelos 8 e 9, sendo praticamente igual ao do Modelo 9. O diagrama dos resíduos para os dois últimos modelos também é semelhante ao mostrado na Figura 7.2. Assim, é possível concluir que tanto a variável AVGR quanto a variável FTiH do alinhamento em planta pode ser associada à variável FTiV_{ascendente} para explicar em torno de 70% da variabilidade observada nos dados.

7.4 Determinação de um modelo de previsão da V₈₅ para a rodovia estudada

O modelo determinado na seção 7.2 levou em conta toda a base de dados disponível, referente aos dois sentidos de cada um dos 25 trechos estudados (amostra formada por 50 elementos). Ou seja, sua aplicabilidade como modelo de previsão não pode ser testada via processo de validação.

Assim, para a determinação de um modelo de previsão que possa ser utilizado para a estimativa da V₈₅ em diferentes trechos da rodovia estudada, a base original dos dados foi dividida em duas partes: uma para a elaboração do modelo e outra para sua validação. Para tanto, usando uma tabela de números aleatórios, foram selecionados 20% dos casos da base de dados, resultando na retirada de 10 trechos-sentidos. As linhas da Tabela 7.5 que estão achuradas correspondem aos dados que foram deixados de fora do novo modelo.

Tabela 7.5: Trechos-sentidos integrantes da base de dados.

TRECHO - SENTIDO	ÍNDICES AGREGADOS DE GEOMETRIA							TIPO E DENSIDADE DA OCUPAÇÃO LINDEIRA	DENSIDADE DE PONTOS DE INTERSEÇÕES E ACESSOS	
	Alinhamento Horizontal			Alinhamento Vertical					Interseções	Acessos
	S _(planta)	FT _i H	AVG R	VAVGK	FT _i V (ascendente)	FT _i V (descendente)	S _(perfil)			
Trecho 1-1	40.535	0.303	985.00	215.385	1564.000	0.000	2.600	semi-urbana	1	1
Trecho 2-1	61.383	0.649	429.55	112.000	5618.720	0.000	2.269	rural	0	0
Trecho 3-1	44.947	0.529	600.00	126.512	2167.894	0.000	4.650	rural	0	0
Trecho 4-1	0.000	1.000	0.00	376.471	1573.852	0.000	0.850	rural	0	1
Trecho 5-1	22.049	0.557	1150.00	681.403	12.000	119.400	0.916	rural	1	0
Trecho 6-1	0.000	1.000	0.00	138.600	936.814	0.000	1.443	rural	0	0
Trecho 7-1	0.000	1.000	0.00	566.667	180.000	0.000	1.200	rural	0	0
Trecho 8-1	0.000	1.000	0.00	1332.346	0.000	529.000	0.409	rural	0	1
Trecho 9-1	0.000	1.000	0.00	338.792	86.000	138.000	1.650	rural	0	1
Trecho 10-1	0.000	1.000	0.00	3529.412	152.400	0.000	0.170	rural	0	0
Trecho 11-1	0.000	1.000	0.00	2962.963	114.600	0.000	0.270	rural	0	1
Trecho 12-1	0.000	1.000	0.00	800.000	400.000	0.000	0.500	rural	1	0
Trecho 13-1	0.000	1.000	0.00	666.667	636.000	0.000	0.600	rural	0	0
Trecho 14-1	59.753	0.270	700.00	148.571	50.000	540.000	4.375	rural	0	0
Trecho 15-1	0.000	1.000	0.00	4000.000	0.000	235.000	0.231	rural	0	2
Trecho 16-1	0.000	1.000	0.00	205.181	0.000	1143.000	1.950	rural	0	0
Trecho 17-1	0.000	1.000	0.00	100.000	0.000	704.000	2.400	rural	0	1
Trecho 18-1	0.000	1.000	0.00	71.429	0.000	4408.000	2.800	rural	0	0
Trecho 19-1	0.000	1.000	0.00	84.164	0.000	1908.000	5.300	rural	0	2
Trecho 20-1	0.000	1.000	0.00	1057.714	0.000	280.000	2.000	rural	1	0
Trecho 21-1	0.000	1.000	0.00	48.276	1178.000	540.000	6.744	rural	0	1

Continuação Tabela 7.5: Trechos-sentidos da base de dados

Trecho 22-1	11.450	0.800	1000.00	1025.000	342.000	0.000	1.100	rural	0	0
Trecho 23-1	0.000	1.000	0.00	176.032	40.000	140.000	4.629	rural	0	2
Trecho 24-1	0.000	1.000	0.00	76.712	221.000	840.000	3.650	rural	0	1
Trecho 25-1	0.000	1.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	rural	0	2
Trecho 1-2	40.535	0.303	985.00	215.385	0.000	1564.000	2.600	semi-urbana	0	2
Trecho 2-2	61.383	0.649	429.55	112.000	0.000	5618.720	2.269	rural	0	2
Trecho 3-2	44.947	0.529	600.00	126.512	0.000	2167.894	4.650	rural	0	0
Trecho 4-2	0.000	1.000	0.00	376.471	0.000	1573.852	0.850	rural	0	1
Trecho 5-2	22.049	0.557	1150.00	681.403	119.400	12.000	0.916	rural	1	0
Trecho 6-2	0.000	1.000	0.00	138.600	0.000	936.814	1.443	rural	1	0
Trecho 7-2	0.000	1.000	0.00	566.667	0.000	180.000	1.200	rural	0	0
Trecho 8-2	0.000	1.000	0.00	1332.346	529.000	0.000	0.409	rural	1	1
Trecho 9-2	0.000	1.000	0.00	338.792	138.000	86.000	1.650	rural	0	1
Trecho 10-2	0.000	1.000	0.00	3529.412	0.000	152.400	0.170	rural	0	0
Trecho 11-2	0.000	1.000	0.00	2962.963	0.000	114.600	0.270	rural	0	1
Trecho 12-2	0.000	1.000	0.00	800.000	0.000	400.000	0.500	rural	1	0
Trecho 13-2	0.000	1.000	0.00	666.667	0.000	636.000	0.600	rural	0	0
Trecho 14-2	59.753	0.270	700.00	148.571	540.000	50.000	4.375	rural	0	1
Trecho 15-2	0.000	1.000	0.00	4000.000	235.000	0.000	0.231	rural	0	0
Trecho 16-2	0.000	1.000	0.00	205.181	0.000	0.000	1.950	rural	0	0
Trecho 17-2	0.000	1.000	0.00	100.000	704.000	0.000	2.400	rural	0	1
Trecho 18-2	0.000	1.000	0.00	71.429	4408.000	0.000	2.800	rural	0	1
Trecho 19-2	0.000	1.000	0.00	84.164	1908.000	0.000	5.300	rural	0	1
Trecho 20-2	0.000	1.000	0.00	1057.714	280.000	0.000	2.000	rural	0	1
Trecho 21-2	0.000	1.000	0.00	48.276	540.000	1178.000	6.744	rural	1	1
Trecho 22-2	11.450	0.800	1000.00	1025.000	0.000	342.000	1.100	rural	1	0
Trecho 23-2	0.000	1.000	0.00	176.032	140.000	40.000	4.629	rural	0	0
Trecho 24-2	0.000	1.000	0.00	76.712	840.000	221.000	3.650	rural	0	1
Trecho 25-2	0.000	1.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	rural	0	1

Com a retirada dos 10 trechos-sentidos, os intervalos das variáveis continuaram os mesmos apresentados para o item 7.3. Os procedimentos adotados nos item 7.1, 7.2 e 7.3 foram repetidos para se chegar a um novo modelo.

(a) Diagrama de Dispersão

A elaboração dos diagramas de dispersão para o conjunto de trechos-sentidos a serem incluídos na elaboração do modelo também mostrou que, dentre as variáveis estudadas, somente para a variável independente Fator de Tangente Vertical Ascendente ($FT_i V_{\text{ascendente}}$) a dispersão com tendência linear apresentou R^2 superior a 0,5.

(b) Matriz de coeficientes de correlação de Pearson

Na Tabela 7.6 é apresentada a matriz de correlação linear entre a variável dependente (V_{85}) e as variáveis independentes, e destas entre si.

Tabela 7.6: Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson.

Variável	$S_{(\text{planta})}$	FTiH	AVGR	VAVGK	$FT_i V_{(\text{asc})}$	$FT_i V_{(\text{desc})}$	$S_{(\text{perfil})}$	Densidade	V_{85}
$S_{(\text{planta})}$	1.000								
FTiH	-0.933	1.000							
AVGR	-0.886	0.905	1.000						
VAVGK	-0.242	0.227	0.195	1.000					
$FT_i V_{(\text{asc})}$	0.302	-0.1	-0.18	-0.223	1.000				
$FT_i V_{(\text{desc})}$	0.044	-0.05	-0.02	-0.273	-0.254	1.000			
$S_{(\text{perfil})}$	0.304	-0.27	-0.18	-0.590	0.131	0.29	1.000		
Densidade	0.104	-0.200	-0.09	-0.161	0.119	0.002	0.300	1.000	
V_{85}	-0.500	0.413	0.482	0.144	-0.781	0.343	0.00	-0.199	1.000

Os resultados obtidos para a matriz de correlação de Pearson são bastante semelhantes aos mostrados na Tabela 7.2, referentes ao conjunto de todos os 50 trechos- sentido da base de dados.

(c) Modelos gerados

Seguindo os mesmos procedimentos adotados no item 7.3, chegou-se aos resultados da Tabela 7.7.

Tabela 7.7: Resumo dos modelos lineares usados para identificar as variáveis intervenientes na V_{85} para a rodovia estudada.

CONSTANTES E LISTA DE VARIÁVEIS	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3		MODELO 4		MODELO 5		MODELO 6		MODELO 7	
	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p
Constante	83.958	0.000	82.329	0.000	77.873	0.000	76.096	0.000	75.167	0.000	90.722	0.000	95.417	0.000
$S_{(planta)}$	0.165	0.365	0.192	0.266	0.233	0.152	0.261	0.11	0.22	0.169				
$FTIH$	17.914	0.253	19.892	0.184	24.206	0.078	26.656	0.054	33.935	0.008	17.986	0.000	15.448	0.000
$AVGR$	0.001	0.201	0.001	0.182	0.001	0.212	0.001	0.233						
$VAVGK$	0.000	0.815												
$FT_iV_{(ascendente)}$	-0.007	0.000	-0.007	0.000	-0.007	0.000	-0.008	0.000	-0.008	0.000	-0.007	0.000	-0.007	0.000
$FT_iV_{(descendente)}$	0.002	0.197	0.001	0.203	0.001	0.193								
$S_{(perfil)}$	1.068	0.135	0.904	0.121	0.814	0.148	1.056	0.052	1.183	0.029	1.247	0.022		
Densidade	-0.839	0.382	-0.644	0.466										
R^2 Ajustado	0.745		0.753		0.757		0.751		0.748		0.741		0.708	
Valor de "p" para o Modelo	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	

$$\text{Modelo 6: } V_{85} = 90,722 + 17,986 \times FT_iH - 0,007 \times FT_iV_{(ascendente)} + 1,247 \times S_{(perfil)} \quad (6.2)$$

$$\text{Modelo 7: } V_{85} = 95,417 + 15,448 \times FT_iH - 0,007 \times FT_iV_{(ascendente)} \quad (6.3)$$

Embora, o Modelo 6 tenha atendido a todos os critérios: (i) variáveis significativas para $\alpha = 5\%$, (ii) R^2 ajustado aceitável, (iii) resíduos(ver Figura 7.3) razoavelmente bem distribuídos em torno do valor central (não sendo observada uma tendência nos valores dos resíduos) e (iv) o modelo estatisticamente significativo, uma característica desse modelo não recomenda sua utilização. O sinal (positivo) do coeficiente da variável Sinuosidade em Perfil (S_{perfil}) não era esperado, uma vez que, sob a ótica da Engenharia de Tráfego, a medida que a sinuosidade em perfil aumenta a tendência é de se ter redução da velocidade operacional, e não um aumento da mesma. Por esse motivo, optou-se por eliminar a variável sinuosidade em perfil (S_{perfil}) e obter o Modelo 7, apresentado pela Equação 7.3. Para o Modelo 7 os critérios citados também foram atendidos (ver Tabela 7.7 e Figura 7.4).

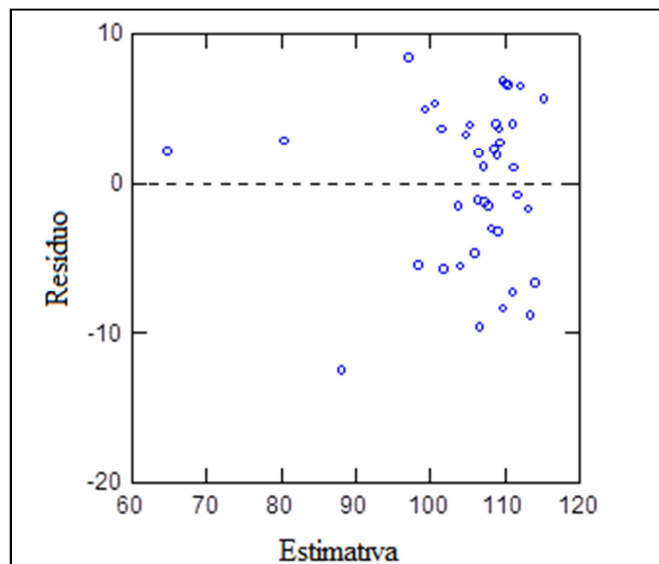


Figura 7.3: Gráfico de Resíduos do Modelo 6

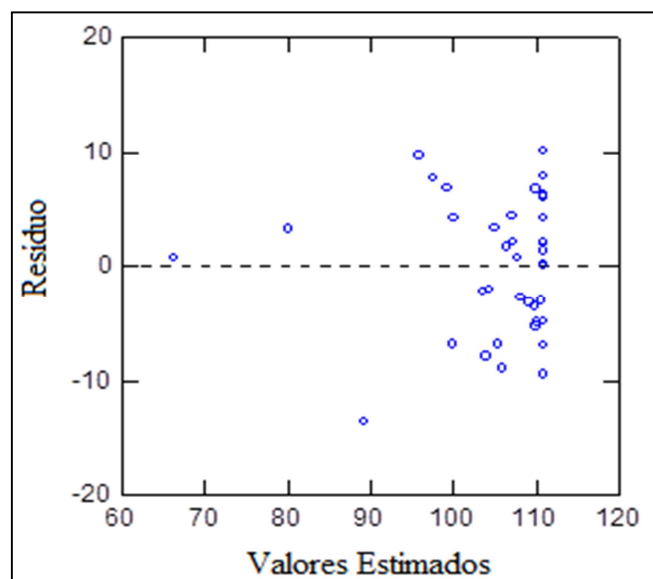


Figura 7.4: Gráfico de Resíduos do Modelo 7

Do mesmo modo que o realizado na seção 7.2, foram analisados modelos alternativos onde a variável FTiH foi substituída pelas outras variáveis relacionadas às características do alinhamento horizontal, conforme mostra a Tabela 7.8.

Tabela 7.8: Resumo dos modelos adicionais estudados para a base de dados reduzida.

Constante e Lista de Variáveis	Modelo 7		Modelo 8		Modelo 9	
	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p	Coefficiente	Valor-p
Constante	95,417	0,000	110,323	0,000	101,175	0,000
FTiV(ascendente)	-0,007	0,000	-0,006	0,000	-0,007	0,000
FTiH	15,448	0,000				
S _(planta)			-0,167	0,000		
AVGR					0,001	0,000
R ² Ajustado	0,708		0,672		0,717	
Valor de “p” para o modelo	0,000		0,000		0,000	

Do mesmo modo que o ocorrido quando da análise da base completa de dados, a Tabela 7.8 mostra que tanto a variável FTiH quanto a variável AVGR explicam em torno de 71% da variabilidade observada nos dados. O diagrama de resíduos referente aos Modelos 8 e 9 também possui características semelhantes às do diagrama mostrado na Figura 7.4. É interessante notar que a Equação obtida para o Modelo 9 possui os coeficientes associados às variáveis com os mesmos valores obtidos quando o modelo foi calibrado para a base completa de dados (ver Modelo 7 na Tabela 7.4). No caso da constante, o valor de 101,175 também é bastante semelhante ao do modelo mostrado na Equação 7.1, que é de 99,490. Por essa razão, tanto o Modelo 7 quanto o Modelo 9 (ver Equação 7.4) serão objeto da verificação quanto à validação, mediante sua aplicação aos trechos-sentidos selecionados para este fim.

$$\text{Modelo 9: } V_{85} = 101,175 + 0,001 \times AVGR - 0,007 \times FT_i V_{(ascendente)} \quad (7.4)$$

De forma a validar os Modelos 7 e 9, aplicou-se, respectivamente, as Equações 7.3 e 7.4 para prever a velocidade operacional para aqueles 10 trechos-sentido que não entraram no desenvolvimento dos modelos. Os dados das variáveis explicativas consideradas nos dois modelos, juntamente com o valor da V_{85} observada, são apresentados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9: Dados dos trechos analisados no processo de validação dos modelos.

Trecho	V ₈₅ Observada (km/h)	FTiV _(ascendente) ((%×m)	AVGR (m)	FTiH (km/km)
1	63,76	2167,89	600,0	0,529
2	113,75	180,00	10000,0	1,000
3	107,57	86,00	10000,0	1,000
4	116,2	0,00	10000,0	1,000
5	111,03	1178,00	10000,0	1,000
6	114,87	221,00	10000,0	1,000
7	95,39	0,00	429,6	0,649
8	109,63	119,40	1150,0	0,557
9	107,88	280,00	10000,0	1,000
10	108,32	840,00	10000,0	1,000

Os resultados da aplicação dos dois modelos aos dados da Tabela 7.9 são apresentados na Tabela 7.10 e Figura 7.5. Verifica-se, com base nesses resultados, que o desempenho dos dois modelos é bastante similar, sendo que em 7 dos 10 trechos considerados o erro absoluto ficou abaixo de 8,0 km/h, e em outros dois trechos foi igual ou inferior a 10 km/h. Somente no Trecho 1 é que a diferença entre o valor estimado e o observado foi exagerada para os dois modelos (acima de 20 km/h). Observando-se os dados desse trecho, verifica-se que ele é o único em que houve associação de condições mais desfavoráveis em planta e perfil. Observando-se a base de dados global, verifica-se que este caso (que foi por sorteio aleatório excluído da base de dados usada para elaborar o modelo) é um dos dois casos, em toda a base, em que valor de $FTiV_{(ascendente)}$ superior a 2000,00 %×m está associado a raio médio de curva horizontal igual ou inferior a 600m.

Assim, fica claro que a base de dados para a elaboração do modelo precisa ser ampliada para incluir mais situações desse tipo para que o modelo de previsão possa contemplá-la devidamente. É importante ressaltar que, na fase de elaboração do modelo, o próprio programa estatístico identificou este ponto como um valor extremo (*outlier*).

Tabela 7.10: Resultados da verificação da validação dos Modelos 7 e 9.

Trecho	Estimativa da V_{85} (km/h)		Diferença entre V_{85} estimada e V_{85} observada			
			Modelo 7		Modelo 9	
	Modelo 7	Modelo 9	Absoluta (km/h)	Percentual (%)	Absoluta (km/h)	Percentual (%)
1	88,41	86,60	24,65	38,66	22,84	35,82
2	109,61	109,92	-4,14	-3,64	-3,83	-3,37
3	110,26	110,57	2,69	2,5	3,00	2,79
4	110,87	111,18	-5,33	-4,59	-5,02	-4,32
5	102,62	102,93	-8,41	-7,57	-8,10	-7,3
6	109,32	109,63	-5,55	-4,83	-5,24	-4,56
7	105,44	101,60	10,05	10,54	6,21	6,51
8	103,19	101,49	-6,44	-5,87	-8,14	-7,42
9	108,91	109,22	1,03	0,95	1,34	1,24
10	104,99	105,30	-3,33	-3,07	-3,02	-2,79

A diferença percentual (DIFPER) entre a V_{85} estimada ($V_{85est.}$) e a V_{85} observada ($V_{85obs.}$) foi determinada por meio da Equação 7.5.

$$DIFPER = \left(\frac{V_{85_{est.}} - V_{85_{obs.}}}{V_{85_{obs}}} \right) \times 100 \quad (7.5)$$

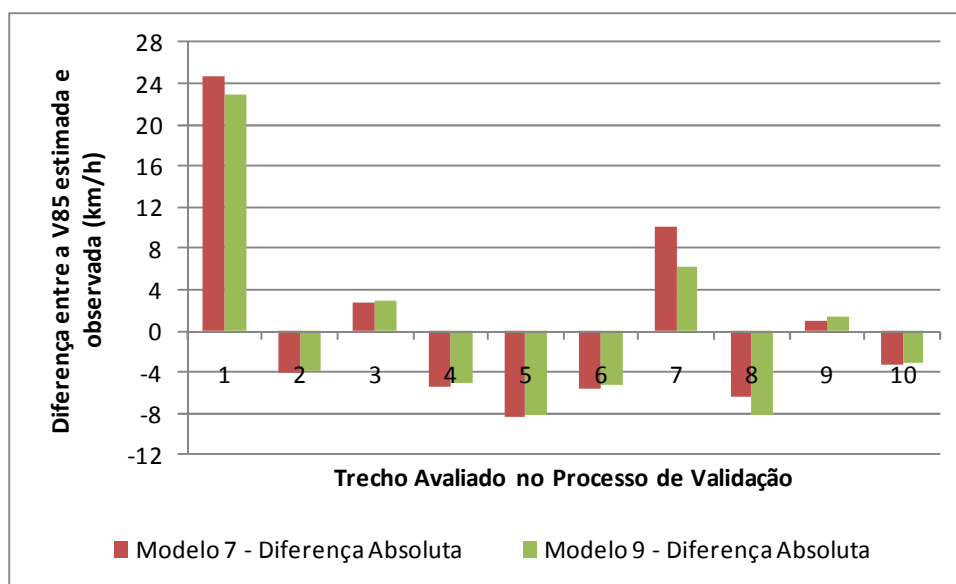


Figura 7.5: Diferença absoluta entre os valores estimados e observados da V_{85}

7.5 TÓPICOS CONCLUSIVOS

- O estudo da base global dos dados, formada por 50 observações (cada observação correspondente a um dos sentidos de 25 trechos viários), mostrou que dentre as variáveis estudadas, as que melhor explicam a V_{85} observada são: Fator de Tangente Vertical Ascendente $FTiV(\text{ascendente})$, associado ao Raio Médio de Curva Horizontal (AVGR) ou à variável Fator de Tangente Horizontal (FTiH). Resultado similar foi encontrado no caso do desenvolvimento do modelo de previsão. Ou seja, em futuros estudos para definição de modelos de previsão para estimativa da V_{85} em trechos viários, essas três variáveis devem ser consideradas. No caso da AVGR e FTiH, é preciso levar em conta que elas são altamente correlacionadas entre si.
- De acordo com o estudo realizado, para a estimativa da V_{85} em trechos viários da rodovia DF-250, pode ser utilizado o Modelo 7 ou o Modelo 9, definidos, respectivamente, pelas Equações 7.3 e 7.4. Destaca-se, ainda, que dada a pouca participação de trechos com combinação de condições desfavoráveis de alinhamento em planta e perfil, deve ser evitado o uso dos referidos modelos para a estimativa da V_{85} para trechos nessa situação.
- Estudos futuros devem ser realizados no sentido de ampliar a base de dados empregada no desenvolvimento dos modelos, de modo a incorporar uma maior variabilidade de combinações das características dos alinhamentos horizontal e vertical. Essa base ampliada deve ser empregada para uma nova calibração dos modelos obtidos
- A metodologia adotada para a análise das variáveis explicativas da V_{85} , e posterior elaboração do modelo de previsão, mostrou-se plenamente satisfatória para o fim pretendido.

8. CAPÍTULO

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A velocidade operacional é um elemento importante tanto na definição de limite de velocidade quanto na análise de consistência geométrica. Para efeito da promoção da segurança viária, também é fundamental conhecer a relação entre a velocidade operacional e a velocidade de projeto, sendo que esta última é muitas vezes empregada no Brasil como elemento base para a definição da velocidade limite.

Neste contexto, o presente trabalho se propôs atingir os seguintes objetivos: estudar a velocidade operacional em trechos viários com base nas suas características geométricas, expressas em índices que refletem as condições gerais do alinhamento; desenvolver modelo de previsão da velocidade operacional, considerando as variáveis que refletem as características geométricas de cada trecho; e fazer uma análise crítica da velocidade operacional com relação à velocidade de projeto em cada trecho formado por um ou mais segmentos homogêneos. Conforme apresentado nos Capítulos 6 e 7 os objetivos estabelecidos foram alcançados.

Para o desenvolvimento do trabalho, partiu-se da hipótese de que a velocidade operacional dos veículos nas rodovias brasileiras de pista simples é superior à velocidade de projeto destas rodovias, e que a relação entre elas em um dado trecho viário depende das características específicas dos elementos que o compõem e da forma como estes elementos estão combinados no trecho. Com os resultados dos Capítulos 6 e 7 foram confirmadas as hipótese do trabalho para a rodovia DF-250. Isto é, verificou-se que efetivamente a V_{85} é, em geral, superior a velocidade de projeto, e que essa diferença varia entre os trechos. Ou seja, a forma como o alinhamento horizontal e vertical são combinados entre si. A própria equação do modelo de previsão (no caso dos dois modelos obtidos) mostra que a V_{85} é fruto da combinação linear dos valores de um índice que representa o alinhamento vertical com outro associado ao alinhamento horizontal.

Nas seções a seguir são destacados os principais resultados e limitações da presente pesquisa, bem como apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

8.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

O método adotado para a análise das variáveis explicativas da V_{85} , e posterior elaboração do modelo de previsão, mostrou-se plenamente satisfatório para o fim pretendido. Com o método empregado foi possível à identificação para a rodovia estudada das principais variáveis agregadas que devem ser consideradas em modelos de previsão da V_{85} .

Como resultado, para a rodovia DF-250, dentre as variáveis estudadas, as que melhor explicam a velocidade operacional foram o Fator de Tangente Vertical Ascendente, associado ao Raio Médio de Curva Horizontal (Modelo 9) ou à variável Fator de Tangente Horizontal (Modelo 7). Esses dois modelos mostraram-se significativos e com valor de R^2 em torno de 0,71. A análise dos resíduos para os dois modelos também foi favorável. Assim, exceto para os casos da combinação de situações restritivas conjuntas para o alinhamento horizontal e vertical, os dois modelos podem ser empregados para a estimativa da V_{85} em diferentes trechos da DF-250.

A metodologia do tratamento e da análise das variáveis explicativas mostrou-se eficiente para o objetivo de se determinar um modelo de previsão da V_{85} para trechos formados por dois ou mais segmentos homogêneos. Ou seja, ela pode ser adotada para estudos similares em outras rodovias.

O procedimento adotado para coleta de dados de velocidade operacional com o uso do veículo instrumentado mostrou um bom potencial para a realização de estudos em locais onde as condições da via não favorecem o uso de métodos que exijam a permanência de pesquisadores parados em pontos da rodovia. Além disso, por permitir a elaboração de perfis de velocidade, permite a realização de análises complementares à da determinação da V_{85} por trecho, como é o caso da análise da consistência geométrica do traçado.

8.2 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Inicialmente pensou-se em realizar a coleta de dados de velocidade pelo método da coleta de placas, mas devido a questão relacionada à segurança dos pesquisadores em campo, decidiu-se por adotar o método do veículo instrumentado. Este inicialmente só seria utilizado para uma coleta de dados menos abrangente, visando especificamente à elaboração dos perfis de velocidade representativos de cada trecho. No entanto, a rodovia

não possui na extensão pesquisada, acostamento com dimensões que possibilitassem a coleta de dados sem comprometer a segurança dos pesquisadores.

Apesar do método do veículo instrumentado ter se mostrado eficiente para a coleta de dados de velocidade, o número de observações foi bem menor do que se fosse utilizado o método da coleta de placas. Isto ocorreu devido à dificuldade de encontrar motoristas com disponibilidade para participar da pesquisa nos horários em que o fluxo de veículos era baixo o suficiente para permitir classificar a situação como de fluxo livre (bem cedo pela manhã e em horários de fraco movimento nos finais de semana). Além disso, dado que: (i) a extensão total da parte da rodovia considerada no estudo foi em torno de 30 km, o percurso efetuado por cada condutor foi de aproximadamente 60 km; e (ii) que esta rodovia fica um pouco afastada do Plano Piloto, o custo do levantamento tornou proibitivo uma maior ampliação da amostra (tanto do número de trechos estudados quanto do número de motoristas a percorrer cada trecho).

8.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados do presente trabalho recomenda-se o seu prosseguimento mediante a realização dos seguintes estudos:

- Complementar o tratamento dos dados da velocidade coletados para cada motorista de modo a poder traçar o perfil da velocidade operacional para cada trecho e, posteriormente, analisa-lo em conjunto com os projetos em planta e perfil do trecho. Desta forma, poderá ser avaliada a consistência do traçado.
- Ampliar a base de dados empregada no desenvolvimento dos modelos, de modo a incorporar uma maior variabilidade de combinações das características dos alinhamentos horizontal e vertical. Essa base ampliada deve ser empregada para uma nova calibração dos modelos obtidos para a DF-250.
- Definir um modelo mais geral para estimativa da velocidade operacional em rodovias do Distrito Federal mediante a coleta de dados em diferentes rodovias do DF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1994). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- AASHTO (2004). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- Abdul-Mawjoud, A.A., Sofia, G.G. (2008). Development of Models for Predicting Speed on Horizontal Curves for Two-Lanes Rural Highways. The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 33, Number 2-B, pp. 365 – 377.
- Abdul-Mawjoud, A.A., Sofia, G.G. (2008). Development of Models for Predicting Speed on Horizontal Curves for Two-Lanes Rural Highways. The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 33, Number 2-B, pp. 365 – 377.
- Basso, J. A. (2008). Estabelecimento de Limites de Velocidade em Rodovias no Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- Bella, F. (2008). Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. Accident Analysis and Prevention, Vol. 40, Issue 3, May 2008, pages 1078-1087.
- Bella, F., D'Agostini Giulia (2010). Driving Simulation for Design Consistency. 4th International Symposium of Highway Geometric Design – June 2-5, Valencia.
- Bella, F. (2005). Operating speed predicting models on two-lane rural roads from driving simulation. In: Proceedings of the 84th Annual Meeting Transportation Research Record, Washington.
- Bortot M.E., A. C. (2008). Manual de Instruções: Odômetro Trip TOTEM e Odômetro Trip TOTEM CR.
- Brasil (1997). Lei No. 9503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. São Paulo.

- Castro, M.; José F. Sánchez; Ardila N; Melo, J. (2010). Speed Models for highway consistency analysis. A Colombian Case study .4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia, June 2010.
- CNT – Confederação Nacional dos Transportes. Pesquisa CNT de Rodovias 2010. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Pesquisas_Detalhes.aspx?p=3> Acesso em: junho de 2010.
- CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito (2007). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume I – Sinalização Vertical de Regulamentação. 2ª Edição. Brasília: CONTRAN, 2007.
- Dell’Acqua, G.; Abate D.; Lamberti, R (2007). Driver speed behavior on two-lane rural highways in Southern Italy. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM
- DER/SP – Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (2005). Projeto Geométrico. São Paulo.
- DER/SP – Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (2006). Notas Técnicas de Projeto Geométrico. São Paulo.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). Manual de projeto geométrico de rodovias rurais. Rio de Janeiro.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). Manual De Projeto e Práticas Operacionais para Segurança nas Rodovias.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Plano Nacional de Viação - PNV. Disponível em <<http://www.dnit.gov.br>>. Acesso em: maio de 2011.
- Faezin S. F., Hamid H., Davoodi S. R. (2011). Predicting Speed Model of Horizontal Curves on Exclusive Motorcycle Lane. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(5): 590-598.
- FHWA - Federal Highway Administration (2003). MUTCD – Munual on Uniform Traffic Control Devides for Streets and Highways. 2003 Edition. Washington D.C:

FHWA, 2003.

FHWA (2000). Evaluation of Design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways, Executive Summary. Federal Highway Administration, FHWA-RD-99-173(25):1-25.

FHWA – Federal Highway Administration (1998). Travel Time Data Collection Handbook. Research Report 07470-1F.

Filho, G. P. (1998). Estradas de Rodagem - Projeto Geométrico. Ed. Eletrônica. São Carlos, SP.

Fitzpatrick, K., Harwood, D. W., Wooldridge, M.D., Potts, I.B., Elefteriadou, L., Torbic, D.J. (2003). Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roads. NCHRP Report 502. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2003.

Fitzpatrick, K., Anderson, I.B., Bauer, K.M., Collins, J.M., Elefteriadou, L., Green, P., Harwood, D.W., Irizarry, N., Koppa, R., Krammes, R.A., McFadden, J., Parma, K.D., Passetti, K., Poggioli, B., Tsimhony, O., Wooldridge, M.D. (2000b). Evaluation of Design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways – Executive Summary. Report FHWA-RD-99-173, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D.W., Collins, J.M., McFadden, J., Anderson, I.B., Krammes, R.A., Irizarry, N., Parma, K.D., Bauer, K.M., Passetti, K., (2000a). Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways. Report FHWA-RD-99-171, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Fitzpatrick, K., Krammes, R. and Fambro, D. (1997) Design speed, operating speed and posted speed relationships. ITE Journal, Vol. 67, No. 2.

Fitzpatrick, K.; Shaw-Pin Miaou; Marcus Brewer; Paul Carlson; and Mark D. Wooldridge (2005). Exploration of the Relationships between Operating Speed and Roadway Features on Tangent Sections. Journal of Transportation Engineering ASCE, April 2005, pp. 261 – 269.

- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M.A., Wooldridge, M.D., Miaou, S.P. (2003). Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Practices. NCHRP Report 504. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Garcia, D. S. P. (2008). Método para análise da consistência geométrica em rodovias brasileiras de pista simples. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 353p.
- Gong, H. (2007). Operating Speed Prediction Models for Horizontal Curves on Rural Four-Lane Non-Freeway Highways. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the College of Engineering at the University of Kentucky.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2006). Impactos Sociais e Econômicos dos Acidentes de Trânsito nas Rodovias Brasileiras – Relatório Executivo. Brasília.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2008). Texto para discussão nº 1344: Fatores Condicionantes da Gravidade dos Acidentes de Trânsito nas Rodovias Brasileiras. Brasília.
- Islam, M. N., and Seneviratne, P. N. (1994). Evaluation of Design Consistency of Two-Lane Rural Highways. ITE JOURNAL, February 1994.
- ITE – Institute of Transportation Engineers (1992). Traffic Engineering Handbook, 4^a Ed. Prentice Hall, New Jersey.
- ITE – Institute of Transportation Engineers (1994). Manual of Transportation Engineering Studies. Spot Speed Studies. Washington DC, Institute of Transportation Engineers, Prentice Hall.
- Lamm, R., Psarianos, B., Choueiri, E.M., Soilemezoglou, G. (1995). A practical safety approach to highway geometric design international case studies: Germany, Greece, Lebanon, and the United States. In: International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Conference Proceedings, Chapter 9, pp. 9-1 a 9-14. Boston, Massachusetts, August 30 – September 1.

- Lamm, R., Psarianos, B., Mailaender, T. (1999). Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook. New York, McGraw-Hill.
- Lee, S. H (2008). Introdução ao Projeto Geométrico de Rodovias. 3ª edição. Santa Catarina: Editora UFSC.
- Malyszhkina, N.V and Mannering, F. (2008). Effect of Increases in Speed Limits on Severities of Injuries in Accidents. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2083, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 122–127.
- Ministério da Saúde (2010). Sistema de Informações de Mortes - Datasus. Mortes por causas externas no período 2004-2008. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sim/cnv/extsp.def>>. Acesso em: 15 janeiro de 2010.
- Misaghi, P., and Hassan, Y. (2005). Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads. Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, nº 6, pp. 408-417.
- Rakha, H.; El-Shawarby, I.; Setti, J.R. (2007). Characterizing Driver Behavior on Signalized Intersection Approaches at the Onset of a Yellow-Phase Trigger. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 8, nº 4.
- Santos, C. (2007). Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem, Lisboa, Edições Sílabo.
- Skszek, S.L. (2004). Actual Speeds on the Roads Compared to the Posted Limits. Final Report 551. Sponsered by Arizona Department of Transportation in cooperation with FHWA, 2004.
- Srinivasan, R., Parker, M., Harkey, D., Tharpe, D. and Sumner, R. (2006). Expert System for Recommending Speed Limits in Speed Zones. Project NCHRP Project No. 3-67. Transportation Research Board, Washington, D.C. (November 2006).
- Tarris, J. P.,Poe, C. M., Mason Jr, J. M. and Goulias, K. G. (1997). Predicting Operating Speeds on Low-Speed Urban Streets: Regression and Panel Analysis

Approaches. Journal of the Transportation Research Board, ISSN 0361-1981, Volume 1523 / 1996.

TRB (1998). Special Report 254: Managing Speed – Review of current practice for setting and enforcing speed limits. Transportation Research Board, National Academy Press. Washington DC.

Trentin, L. C. (2007). Análise crítica de métodos de verificação de consistência de traçado. 165f. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.

Tsu, B.S.A. (2003). Estabelecimento de limites legais de velocidade em rodovias de pista simples. Dissertação de Mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2003.

Wang, J., Dixon, K. K., Li, H., Ogle, J. (2004). Normal Acceleration Behavior of Passenger Vehicles Starting from Rest at All-Way Stop-Controlled Intersections. Transportation Research Record, nº 1883.

WHO – World Health Organization (2004). Preventing Road Traffic Injuries: A public health perspective for Europe.

WHO – World Health Organization (2009). Global status report on road safety: time for action. Geneva, 2009. Disponível em: <www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2009>. Acesso em: 20/05/2010.

ANEXO 1

Diagramas de dispersão

