

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTES**

Zélia Silveira d’Azevedo

**ELABORAÇÃO DE MODELO DA PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL
DE RODOVIAS EM PISTAS SIMPLES
CONSIDERANDO OS VEÍCULOS DE CARGA**

Porto Alegre

Março/2020

Zélia Silveira d'Azevedo

**ELABORAÇÃO DE MODELO DA PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL
DE RODOVIAS EM PISTAS SIMPLES
CONSIDERANDO OS VEÍCULOS DE CARGA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

Orientador: Professora Christine Tessele Nodari, Dr.

Co-orientador: Daniel Sergio Presta García, Dr.

Porto Alegre

Março/2020

Zélia Silveira d'Azevedo

**ELABORAÇÃO DE MODELO DA PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL
DE RODOVIAS EM PISTAS SIMPLES
CONSIDERANDO OS VEÍCULOS DE CARGA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Christine Tessele Nodari, Dr.

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Alejandro Germán Frank, Dr.

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, *P.hD.*

Professor Ana Margarita Larrañaga Uriarte, Dr.

Professor Alejandro Ruiz Padillo, Dr.

Dedicatória

Aos meus pais por todos os ensinamentos.

Ao meu marido Adriano pelo incentivo, apoio e companheirismo.

Aos meus filhos Henrique, Mariana e Adriana que são o melhor de mim.

Aos meu netos Martin, Julia e Bianca que iluminam a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos professores orientadores Christine Tessele Nodari e Daniel Sergio Presta García que, além de grande incentivo durante a minha jornada, contribuíram significativamente no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e colegas da empresa STE-Serviços Técnicos de Engenharia S.A. pela paciência e apoio durante o período do mestrado.

Aos colegas e amigos do LASTRAN pelo apoio, convivência e conselhos enriquecedores, em particular aos professores Luiz Afonso dos Santos Senna e Fernando Dutra Michel.

Aos professores Helena Beatriz Bettella Cybis, Ana Margarita Larrañaga Uriarte e Alejandro Ruiz Padillo, componentes da banca examinadora, pelas importantes contribuições.

Ao Departamento Autônomo de Rodagem – DAER/RS, e seus funcionários, pelo apoio e empréstimo dos equipamentos de medição.

Ao colega Sander Fraga Farinha da Silva pela imensa colaboração no desenvolvimento da pesquisa.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

E principalmente à minha família, minha base de sustentação. Obrigada por acreditar no meu sonho e sempre me motivar a seguir em frente. Sei que posso contar com vocês em todos os momentos.

RESUMO

Os acidentes de trânsito são considerados como uma das principais causas de morte no mundo. Estes são causados por uma combinação de fatores, porém a velocidade inadequada aparece, geralmente, como a causa principal. Além da questão do excesso de velocidade, também é importante para a segurança no trânsito a investigação da relação entre acidentes com veículos e as características geométricas das rodovias. O 85º percentil possui uma relação profunda com a questão da segurança. Estudos demonstram que motoristas dirigindo a velocidades superiores ao 85º percentil apresentam maior envolvimento em acidentes do que aqueles que conduzem com velocidades até este valor. Muitos modelos foram desenvolvidos para prever perfis de velocidades de veículos de passeio em rodovias de pistas simples, porém somente alguns também consideram perfis de velocidades de veículos de carga. Os projetos geométricos de rodovias devem considerar como veículo de projeto aquele que seja representativo da frota que irá utilizar ou utiliza a rodovia, no Brasil, a presença de veículos de carga é significativa. Neste contexto, o presente trabalho apresenta como objetivo propor um modelo de estimativa do perfil de velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga em função das características geométricas de rodovias de pistas simples. No estudo de caso realizado, foram obtidos modelos com R^2 de 0,6112 para intervalos de rampa em nível e 0,8485 para intervalos de rampa em aclave. Estes modelos podem ser extrapolados em rodovias com as mesmas características que a estudada.

Palavras-chave: velocidade operacional, segurança viária, modelos de previsão de velocidade operacional, rodovias de pista simples

ABSTRACT

Road accidents are considered to be one of the main causes of death in the world. These are caused by a combination of factors, but the inadequate speed usually appears as the main cause. In addition to the issue of speeding, it is also important for traffic safety to investigate the relationship between vehicle accidents and the geometric characteristics of highways. The 85th percentile has a profound relationship with the issue of security. Studies show that drivers driving at speeds higher than the 85th percentile are more involved in accidents than those driving at speeds up to this value. Many models have been developed to predict passenger vehicle speed profiles on single-lane highways, but only a few also consider cargo vehicle speed profiles. The geometrical designs of highways must consider as a project vehicle one that is representative of the fleet that will use or use the highway, in Brazil, the presence of trucks is significant. In this context, the present work presents the objective of proposing a model of estimation of the operational speed profile for different trucks according to the geometric characteristics of two-lane rural highways. In the case study, models with R^2 of 0.6112 were obtained for ramp intervals in level and 0.8485 for ramp-on-slope intervals. These models can be extrapolated on highways with the same characteristics as the one studied.

Keywords: operational speed, road safety, operating speed models, two-lane rural highways

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Estrutura da dissertação..... | 22 |
| Figura 2 - Malha rodoviária federal | 29 |
| Figura 3 - Acidentes de trânsito nas rodovias federais por tipo de pista - 2019 | 30 |
| Figura 4 - Frota de caminhões e utilitários..... | 34 |
| Figura 5 - Perfil de Velocidade | 37 |
| Figura 6 - Fluxograma das etapas metodológicas do estudo..... | 50 |
| Figura 7 - Instalação em pista simples - melhor configuração..... | 58 |
| Figura 8 - Instalação em pista simples - configuração alternativa | 58 |
| Figura 9 - Hiperplano p-dimensional referente às variáveis independentes | 62 |
| Figura 10 - Localização do trecho de estudo (Fonte: elaborada pela autora) | 65 |
| Figura 11 - Tela do <i>software</i> SAEPRO com a geometria do trecho | 66 |
| Figura 12 - Verificação das intertangentes acima de 200m | 66 |
| Figura 13 - Identificação das rampas | 67 |
| Figura 14 - Análise de interferências através do SAEPRO..... | 68 |
| Figura 15 - Vista geral da curva do PI-33 | 68 |
| Figura 16 - Equipamentos disponibilizados pelo DAER | 71 |
| Figura 17 - Instalação dos tubos pneumáticos | 71 |
| Figura 18 - Locais de instalação dos tubos pneumáticos | 72 |
| Figura 19 - Valores Observados x Estimados – modelo 4 (em nível)..... | 82 |
| Figura 20 - BoxPlot - valores observados e estimados - modelo 4 (em nível) | 83 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 - BoxPlot - Diferenças - modelo 4 (em nível) | 83 |
| Figura 22 - Valores Observados x Estimados - modelo 5 (active)..... | 84 |
| Figura 23 - BoxPlot - Observados e Estimados - modelo 5 (active)..... | 85 |
| Figura 24 - BoxPlot - Diferenças - modelo 5 (active)..... | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Acidentes por classificação de vítimas | 25 |
| Tabela 2 - Crescimento geral da frota | 25 |
| Tabela 3 - Razão de chances para a letalidade de vítimas de acidentes nas rodovias federais com características de contexto associadas a probabilidades de morte elevadas e baixas..... | 27 |
| Tabela 4 - Razão de chances para letalidade de vítimas de acidentes nas rodovias federais com características associadas a probabilidade de morte elevadas e baixas..... | 27 |
| Tabela 5 - Letalidade dos acidentes de trânsito nas rodovias federais por tipo de pista - 2019 | 29 |
| Tabela 6 - Letalidade dos acidentes de trânsito ocorridos nas rodovias federais por condição de envolvimento das vítimas - Brasil, 2016..... | 35 |
| Tabela 7 - Distribuição percentual das vítimas fatais de acidentes de trânsito ocorridos nas rodovias federais, por condição de envolvimento e causa do acidente - Brasil, 2016 | 35 |
| Tabela 8 - Modelos para V85 dependentes do raio ou do grau de curvatura..... | 39 |
| Tabela 9 - Modelos para V85 dependentes do raio ou do grau de curvatura considerando outras variáveis | 40 |
| Tabela 10 - Modelos para V85 para curvas dependentes de várias variáveis | 41 |
| Tabela 11 - Modelos estáticos para V85 em tangentes | 43 |
| Tabela 12 - Modelos para V85 em tangentes por Grupo | 44 |
| Tabela 13 - Modelos V85 para caminhões ao longo de uma curva | 45 |
| Tabela 14 - Modelos para V85 no meio da curva | 46 |
| Tabela 15 - Modelos para V85 para caminhões carregados e não carregados..... | 47 |
| Tabela 16 - Principais métodos de análise de consistência geométrica | 49 |

| | |
|--|----|
| Tabela 17 - Desvio padrão para determinação do tamanho da amostra em estudos de velocidade local | 56 |
| Tabela 18 - Constante correspondente ao nível de confiança | 56 |
| Tabela 19 - Classificação ARX (fonte: Manual MetroCount, 2002))..... | 59 |
| Tabela 20 - Equivalência entre as classes ARX e as categorias do DNIT | 60 |
| Tabela 21 - Possíveis curvas para pesquisa de velocidades | 69 |
| Tabela 22 - Curvas selecionadas para o estudo..... | 69 |
| Tabela 23 - Período de coleta e número de sensores por curva | 72 |
| Tabela 24 - Tamanho da amostra por categoria de veículos de carga para curva 37 - bordo interno | 73 |
| Tabela 25 - Resumo da verificação do tamanho da amostra por categoria..... | 74 |
| Tabela 26 - Velocidades operacionais observadas para Parte 1 da amostra | 74 |
| Tabela 27 - Velocidades operacionais observadas para Parte 2 da amostra | 75 |
| Tabela 28 - Base de dados para estimativa do modelo de previsão de velocidades | 76 |
| Tabela 29 - Modelo 1 – considerando as variáveis veículo, bordo, raio e inclinação da rampa | 77 |
| Tabela 30 - Modelo 2 - considerando as variáveis veículo, raio e inclinação da rampa..... | 78 |
| Tabela 31 - Modelo 3 - considerando as variáveis veículo, inverso do raio e inclinação da rampa | 78 |
| Tabela 32 - Modelo 4 - em nível: $+2\% \leq i \leq -2\%$ - considerando as variáveis veículo e raio . | 79 |
| Tabela 33 - Modelo 5 – aclave: $i > +2\%$ - considerando as variáveis veículo e raio | 79 |
| Tabela 34 - Modelo 6 - declive: $i < -2\%$ - considerando as variáveis veículo e raio | 80 |
| Tabela 35 - Base de dados para validação – parte 2 da amostra | 81 |

| | |
|---|----|
| Tabela 36 - Resultados da validação do modelo 4 - em nível..... | 81 |
| Tabela 37 - Resultados da validação do modelo 5 - aclave | 84 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

GPS – Global Position System

MTPA – Ministério dos Transportes Porto e Aviação Civil

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMS – Organização Mundial da Saúde

PAHO - Organização Pan-americana da Saúde

PRF – Polícia Rodoviária Federal

V_{85} - Velocidade correspondente ao 85º Percentil da distribuição de velocidades

VDM – Volume Diário Médio

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 20 |
| 1.2 | HIPÓTESES DA PESQUISA..... | 20 |
| 1.3 | PRESSUPOSTO | 20 |
| 1.4 | DELIMITAÇÕES DO ESTUDO..... | 21 |
| 1.5 | DELINEAMENTO | 21 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 23 |
| 2.1 | RODOVIAS DE PISTA SIMPLES | 28 |
| 2.1.1 | Geometria da via x velocidade x acidentes | 31 |
| 2.2 | VEÍCULOS DE CARGA..... | 33 |
| 2.2.1 | Representatividade na frota brasileira | 34 |
| 2.2.2 | Veículos de carga x acidentes..... | 35 |
| 2.3 | PERFIS DE VELOCIDADE | 36 |
| 2.3.1 | Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional..... | 38 |
| 2.3.1.1 | Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional em Curvas..... | 38 |
| 2.3.1.2 | Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional em Tangentes..... | 43 |
| 2.3.1.3 | Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional considerando veículos de carga..... | 45 |
| 2.4 | APLICAÇÕES DA VELOCIDADE OPERACIONAL | 47 |
| 2.4.1 | Análise da Consistência Geométrica | 48 |
| 3 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 50 |
| 3.1 | CENÁRIO DO ESTUDO | 51 |
| 3.2 | ETAPAS METODOLÓGICAS | 51 |
| 3.2.1 | Seleção e caracterização da rodovia..... | 51 |
| 3.2.2 | Identificação dos segmentos em curva | 52 |
| 3.2.3 | Captura de dados para identificação dos padrões de velocidade..... | 55 |
| 3.2.4 | Tratamento e análise dos dados..... | 60 |
| 3.2.5 | Estimação de Modelos de Previsão da Velocidade Operacional para Diferentes Tipos de Veículos de Carga..... | 63 |
| 4 | ESTUDO DE CASO: RODOVIA ERS-122..... | 64 |
| 4.1 | SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA..... | 64 |
| 4.2 | IDENTIFICAÇÃO DOS SEGMENTOS EM CURVA..... | 66 |
| 4.2.1 | Verificação da independência das curvas | 66 |
| 4.2.2 | Identificação dos segmentos em rampa..... | 67 |
| 4.2.3 | Verificação da Inexistência de Interferências | 67 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 4.2.4 | Seleção dos segmentos em curva..... | 68 |
| 4.3 | COLETA DOS DADOS DE VELOCIDADES..... | 69 |
| 4.3.1 | Tamanho da amostra | 69 |
| 4.3.2 | Coleta dos dados de velocidade pontual..... | 70 |
| 4.4 | TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS..... | 72 |
| 4.4.1 | Tratamento dos dados | 72 |
| 4.4.2 | Análise dos dados | 75 |
| 4.5 | ESTIMAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL PARA DIFERENTES TIPOS DE VEÍCULOS DE CARGA | 76 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 87 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 87 |
| 5.2 | RECOMENDAÇÕES | 89 |
| | REFERÊNCIAS | 90 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com os dados levantados pela Organização Mundial da Saúde em 2018, estima-se que o número de mortes no trânsito é de 1,35 milhões de pessoas a cada ano em todo o mundo. Embora este número tenha se estabilizado nos últimos anos, ainda é considerado elevado. Entre as novas metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), definidas na Assembleia Geral das Nações Unidas de setembro de 2015 tem-se a ODS 3.6 que estabelece a redução, pela metade, do número global de mortes e lesões relacionadas ao trânsito até 2020 (WHO, 2018).

A redução do número de mortes e lesões relacionadas ao trânsito é objetivo global, no entanto, na Região das Américas esse objetivo torna-se premente visto que a taxa de mortalidade no trânsito é uma das mais altas dos países analisados. Aproximadamente 15,9 mortes por 100.000 habitantes em 2013, com uma pequena redução de 2% das mortes se comparadas com os dados de 2013 – 15,6 mortes por 100.000 habitantes em 2016 (WHO, 2018).

Em números absolutos, no Brasil, segundo os dados do Ministério da Saúde, morreram aproximadamente 43 mil pessoas em acidentes de trânsito em 2014, representando uma das principais causas de morte no país. Vinte por cento dessas mortes ocorreram em rodovias federais, que no ano de 2014 tiveram cerca de 170 mil acidentes com mais de 8 mil mortes e 26 mil feridos graves (IPEA, 2015a). De acordo com os dados da Polícia Rodoviária Federal, analisados pelo IPEA, a colisão frontal é o tipo de acidente que mais causa mortes, sendo responsável por 33,7% dos acidentes reportados em 2014 nas rodovias federais. Este tipo de acidente é típico de rodovias de pista simples.

Os acidentes em rodovias de pista simples tendem a ser severos contribuindo para as estatísticas de mortes e feridos no trânsito. Como no Brasil a maioria das estradas federais brasileiras são em pistas simples, este ambiente merece especial atenção na prevenção da acidentalidade. De acordo com dados do Sistema Nacional de Viação - SNV 2019, a malha rodoviária pavimentada brasileira compreende 213.453 km. Sendo que 65.513,3 km de extensão são rodovias federais, destas 87,2% em pista simples, 10,7% em pistas duplicadas e 2,1% em obras de duplicação.

No Brasil, o modo mais utilizado para transporte de bens e pessoas é o rodoviário, com participação de 61% na matriz de transportes de cargas e 95% no transporte de passageiros de

acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias de 2019. É importante salientar que este modal atua como a principal integração de todo o sistema de transporte. Portanto, uma melhor qualidade na infraestrutura rodoviária é extremamente importante para a segurança viária. Para isso são necessários investimentos de forma continuada para um melhor desempenho do transporte no país (CNT, 2019).

Os acidentes de trânsito são causados por uma combinação de fatores, a saber, fatores humanos; fatores relativos ao veículo; à via/meio ambiente; e institucionais/sociais. Os boletins de ocorrências sobre os acidentes registram, via de regra, apenas um fator como contribuinte principal para cada acidente, e que normalmente está relacionado a fatores humanos. A velocidade inadequada aparece, geralmente, como a causa principal, e os demais fatores, tais como, características geométricas desfavoráveis, passíveis de correção, podem ser o foco de intervenção. A correção destas características da via resultaria em redução de acidentes mesmo sem a redução na velocidade por parte dos usuários (LIMA et al., 2008).

Estudos realizados em diversos países apontam o excesso de velocidade como um dos principais problemas de segurança viária. As velocidades maiores aumentam a probabilidade de ocorrência de acidentes, bem como a severidade dos mesmos (FHWA, 2007).

Além da questão do excesso de velocidade, também é importante para a segurança no trânsito a investigação da relação entre acidentes com veículos e as características geométricas das rodovias (PENG; GEEDIPALLY; LORD, 2012) as quais afetam as condições de segurança de diferentes maneiras, como na habilidade do motorista em manter o controle do veículo e identificar situações e características perigosas; na existência de oportunidades de conflitos, tanto em relação à quantidade quanto ao tipo; na consequência de uma saída de pista de um veículo desgovernado; e no comportamento e na atenção dos motoristas (NODARI, 2003). Desta forma, uma geometria inadequada pode ocasionar acidentes, uma vez que os elementos geométricos e de seção transversal, em combinação com as características do tráfego e da área em que a via está inserida, estabelecem um ambiente no qual os condutores escolhem velocidades razoáveis e confortáveis. (FHWA, 2007)

Atualmente gestores de rodovias tem como objetivo desenvolver métodos que não busquem trabalhar apenas o comportamento dos usuários em relação as vias, mas sim melhorar as condições geométricas e funcionais oferecidas aos mesmos. Para isso buscam propor

melhorias às condições das rodovias, proporcionando maiores segurança e comodidade aos condutores (MENEGUZZI; RIVA, 2017).

Existem vários estudos realizados que comprovam que há uma relação estreita de causa e efeito entre a velocidade, a ocorrência de acidentes e a gravidade dos mesmos (GARCÍA, 2002). Segundo Garber e Ehrhart (2000), em seus estudos sobre rodovias do estado da Virginia, Estados Unidos, consideram possível a geração de modelos que relacionam a taxa de acidentes aos efeitos provenientes da velocidade, fluxo de veículos e características geométricas das vias. Lamm *et al.* (1995), em estudo anterior sobre rodovias da Alemanha e dos Estados Unidos, já apresentava modelos para estimativa da velocidade operacional e taxa de acidentes em função da taxa angular de curvatura e da largura da pista.

O conceito de velocidade operacional sofreu várias adequações ao longo do tempo. 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 velocidade operacional é geralmente representada pelo 85º percentil da distribuição de velocidades observadas, obtido a partir da curva de distribuição de frequência acumulada.

O 85º percentil possui uma relação profunda com a questão da segurança. Estudos demonstram que motoristas dirigindo a velocidades superiores ao 85º percentil apresentam maior envolvimento em acidentes do que aqueles que conduzem com velocidades até este valor (DER/SP, 2006).

Muitos modelos foram desenvolvidos para prever perfis de velocidades de veículos de passeio em rodovias de pistas simples, porém somente alguns também consideram perfis de velocidades de veículos de carga. Por esta razão, a maioria dos modelos de consistência geométrica são baseados somente nos perfis de velocidade de veículos de passeio (LLOPIS-CASTELLÓ *et al.*, 2018).

No entanto, os projetos geométricos de rodovias devem considerar como veículo de projeto aquele que seja representativo da frota que irá utilizar ou utiliza a rodovia. No Brasil, a presença de veículos de carga na composição da frota é significativa. Segundo o estudo do Laboratório de transportes – LABTRANS (2008), a participação de veículos pesados varia de 48% (nas rodovias de menor VDM) até 31% (nas rodovias com maior VDM). Portanto, estes tendem a condicionar as características geométricas dos projetos de rodovias.

Nesse contexto, são bem vindas pesquisas que ampliem o conhecimento sobre o real desempenho dos veículos em rodovias de pista simples no que tange a velocidade operacional, considerando a realidade atual da frota brasileira.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral propor um modelo de estimativa do perfil de velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga em função das características geométricas de rodovias de pistas simples.

1.2 HIPÓTESES DA PESQUISA

As hipóteses a serem testadas no presente trabalho são:

- A velocidade praticada por veículos de carga em trajetória do lado externo das curvas tende a ser menor que do lado interno;
- Os diferentes tipos de veículos de carga não apresentam o mesmo padrão de comportamento quanto a velocidade;
- É possível estimar a velocidade operacional segundo características geométricas da via.

1.3 PRESSUPOSTO

Modelos de previsão de velocidade operacional para veículos de passeio tem sido desenvolvidos por diversos pesquisadores em rodovias de pistas simples. Assim como estes modelos, é importante obter um melhor entendimento dos perfis de velocidade dos veículos pesados, uma vez que contribuem significativamente na composição da frota nas rodovias brasileiras. Portanto, acredita-se que é possível desenvolver modelos de previsão de velocidade operacional para veículos pesados com a mesma robustez que os modelos de previsão de velocidade operacional para veículos de passeio.

Os veículos pesados possuem características físicas distintas, tais como, comprimento, largura e altura, além grande variabilidade nas características dinâmicas, como taxa de aceleração, potência do motor e carga transportada. Portanto, é um pressuposto que o comportamento não é igual para todos os tipos de veículos, fazendo com que se tenha optado pelos agrupamentos.

1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente trabalho limita-se a estudar dados obtidos em rodovia de pista simples no estado do Rio Grande do Sul dentro das condições de contorno estabelecidas pelo projeto de experimentos. Buscou-se garantir que as velocidades de veículos de carga analisadas sejam de condutores trafegando em fluxo livre.

Portanto, as curvas pesquisadas foram independentes entre si, sem interferências externas, dentro do intervalo de inclinação longitudinal de -5% a +5% e com raios dentro dos 3 níveis de tratamento estabelecidos ($R < 200\text{m}$, $200\text{m} \leq R < 600\text{m}$, $R \geq 600\text{m}$).

É importante considerar que os veículos de carga que trafegam nas rodovias podem estar carregados ou não carregados. É esperado que a velocidade operacional dos veículos carregados seja menor que a dos veículos não carregados. Porém, no presente estudo não foi possível avaliar este fator, visto que não foram identificados quais veículos estavam carregados e quais não estavam.

1.5 DELINEAMENTO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos distintos, incluindo esta introdução que apresenta a visão inicial do tema a ser abordado. Também são descritos e os objetivos geral e específicos, a justificativa, as delimitações e a estrutura do trabalho.

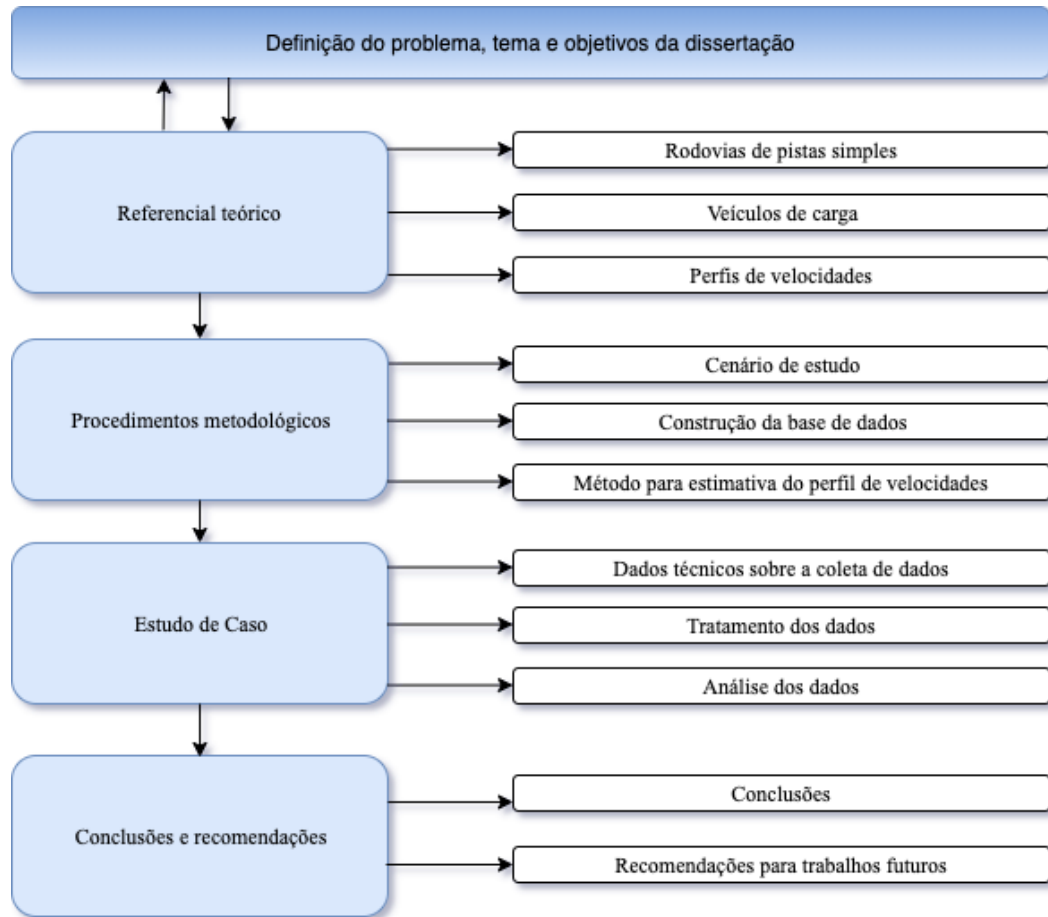
No segundo capítulo, busca-se referenciar teoricamente os aspectos abordados no trabalho. São eles: rodovias de pistas simples, veículos de carga e perfis de velocidades.

O terceiro capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados no trabalho. O capítulo indica o cenário de estudo, sua caracterização e localização, além de justificar a sua escolha. Descreve a construção da base de dados, as técnicas estatísticas utilizadas e o método para a estimativa do perfil de velocidades para diferentes veículos de carga.

O quarto capítulo contempla o estudo de caso. Nele são abordados os dados técnicos sobre a coleta de dados, seu tratamento e a análise dos resultados obtidos. Após, o quinto capítulo apresenta considerações finais da pesquisa, as conclusões e quais recomendações para trabalhos futuros.

A estrutura de desenvolvimento está resumida na **Erro! Fonte de referência não**

encontrada..



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 1 - Estrutura da dissertação

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os acidentes de trânsito continuam sendo um dos principais problemas da sociedade, sendo considerados um problema de saúde pública, uma vez que são fenômenos que afetam os níveis de saúde das populações. De acordo com a Organização Mundial da Saúde, a cada ano, 1,35 milhões de pessoas vão a óbito por acidentes de trânsito no mundo, constituindo-se na oitava causa de morte em todas as faixas etárias, sendo a principal causa de morte entre crianças e jovens adultos na faixa de 5 a 29 anos (WHO, 2018).

Na Região das Américas, houve 154.997 mortes no trânsito em 2016, representando 11% das mortes no trânsito no mundo, sendo que a taxa regional de mortalidade é de 15,6 por 100.000 habitantes, onde os acidentes de trânsito foram a décima causa de morte entre todas as faixas etárias e a segunda principal causa entre as pessoas de 15 a 29 anos. Esta taxa regional é inferior a taxa global de mortalidade, que é de 18,2 por 100.000 habitantes, sendo a segunda mais baixa entre as seis regiões da Organização Mundial da Saúde (Europa, Américas, Pacífico Ocidental, Mediterrâneo Oriental, Sudeste Asiático e África). Porém, com esses dados, a região não conseguirá atingir a meta de reduzir pela metade o número de mortes e lesões relacionadas ao trânsito em 2020.

No Brasil, em maio de 2011, foi lançado o Pacto Nacional pela Redução de Acidentes de Trânsito através dos Ministérios da Saúde e das Cidades, e hoje vinculado ao Ministério de Desenvolvimento Regional. Em 2015, em Brasília, foi realizada a Segunda Conferência Global de Alto Nível sobre Segurança no Trânsito, com a participação de 120 países, cujo texto final reafirma o compromisso com a implementação do Plano de Ação Global para a Década de Segurança no Trânsito (WHO, 2015). Este plano recomenda que as ações devem ocorrer nos diversos níveis (local, nacional, regional e global), com metas e indicadores definidos e implementados de acordo com cinco pilares (ONU, 2011):

- Pilar 1 – Gerenciamento de Segurança Viária: visa incentivar a criação de uma agência líder para desenvolver estratégias, planos e metas nacionais de segurança rodoviária. Que deverá ser sustentada por uma coleta de dados e pesquisas eficientes, que possibilitem avaliar projetos de contramedidas e monitorar a implementação e a eficácia.
- Pilar 2 – Vias mais seguras e mobilidade: visa a melhoria na qualidade das redes viárias, desde o planejamento, como o projeto e a execução, para o benefício de

todos os usuários, especialmente para os mais vulneráveis (pedestres, ciclistas e motociclistas).

- Pilar 3 – Veículos mais seguros: visa incentivar a implantação de tecnologias aprimoradas de segurança veicular para segurança passiva e ativa por meio de uma combinação de harmonização de padrões globais relevantes, esquemas de informações ao consumidor e incentivos para acelerar a adoção de novas tecnologias.
- Pilar 4 – Conscientização dos usuários: visa a implementação de programas abrangentes para melhorar o comportamento dos usuários nas vias. Aplicação eficaz de leis e normas, combinada com políticas públicas de conscientização/educação para aumentar as taxas de uso de cinto de segurança e capacete, gestão da velocidade, o uso do álcool e outros fatores de risco.
- Pilar 5 – Resposta após acidente: visa a garantia de qualidade no atendimento pré-hospitalar e de reabilitação; do seguro ao usuário, e valoriza práticas que auxiliam na melhoria do socorro pós-acidente, como treinamentos, disponibilidade de equipamentos, etc.

Como foco na redução das mortes no trânsito, foi lançado, no Brasil, o programa “Vida no Trânsito” que é parte integrante do projeto *Road Safety in Ten Countries*, coordenado pela OMS. Este programa é liderado no país pelo Ministério da Saúde e pela Organização Pan-americana da Saúde (PAHO) envolvendo iniciativas em cinco municípios: Belo Horizonte, Campo Grande, Curitiba, Palmas e Teresina. O foco está na redução de mortes e lesões no trânsito a partir da qualificação da informação e de ações intersetoriais (ONSV; AMBEV; FALCONI, 2014).

De acordo com o estudo realizado pelo Observatório Nacional de Segurança Viária (2014), para se melhorar os indicadores do Brasil é necessário ter dados mais organizados, consolidados e atualizados para o correto entendimento do problema e busca de soluções. Pois ainda há inconsistências nas estatísticas sobre acidentes de trânsito. Sem esquecer da necessidade de reforço de fiscalização em muitas outras frentes no país. As principais fontes de informação nas estatísticas de acidentes de trânsito são: o Denatran (Departamento Nacional de Trânsito), que tem como base os dados do Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito (Renaest); o Datasus (Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde), que processa dados do Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM) e o Sistema de Informações Hospitalares do SUS - SIH/SUS; e o DPVAT (Danos Pessoais Causados por

Veículos Automotores de Vias Terrestres), os dados divulgados pelas três fontes são divergentes, com diferenças de quase 70% entre os resultados, além de existirem questionamentos sobre a metodologia utilizada, imprecisão de informações e ausência de padronização nos registros de ocorrências (ONSV; AMBEV; FALCONI, 2014).

De acordo com o Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária - MTPA (2018), durante o período de 2010 a 2017, houve 62.120 mortes em rodovias federais, com média de 21 mortes por dia, quase uma vítima por hora. São dados situados em patamar extremamente elevado. Durante este período, houve um decréscimo importante no número de acidentes com vítimas em torno de 15,3%. Já a frota de veículos, neste mesmo período, teve um crescimento geral de 49,8%, e a ampliação da infraestrutura rodoviária federal não foi significativa. A Tabela 1 apresenta a evolução do número de acidentes no período de 2010 a 2017. O crescimento geral da frota está representado na Tabela 2 para o mesmo período.

Tabela 1 - Acidentes por classificação de vítimas

| Acidentes | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Somente com ilesos | 114.055 | 119.838 | 113.727 | 115.582 | 99.975 | 59.936 | 36.134 | 30.680 |
| Com vítimas | 69.326 | 72.381 | 70.710 | 71.144 | 69.370 | 62.219 | 60.226 | 58.716 |
| Total | 183.381 | 192.219 | 184.437 | 186.726 | 169.345 | 122.155 | 96.360 | 89.396 |

Fonte: PRF

Tabela 2 - Crescimento geral da frota

| Região | 2010 | 2017 | Percentual de Crescimento |
|---------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|
| Norte | 3.287.802 | 5.028.603 | 52,9% |
| Nordeste | 9.031.092 | 16.665.260 | 84,5% |
| Centro-Oeste | 5.819.880 | 9.008.814 | 54,8% |
| Sudeste | 33.296.148 | 47.258.591 | 41,9% |
| Sul | 13.383.052 | 19.130.688 | 42,9% |
| Total | 64.817.974 | 97.091.956 | 49,8% |

Fonte: PRF

Estudos vem sendo realizados para analisar o número de vítimas em acidentes de trânsito após o início da Década de Ação pela Segurança no Trânsito – DAST. Segundo De Andrade e Ferreira Antunes (2019), no período anterior a DAST, a taxa de variação percentual mensal (VPM) de mortes no trânsito tinha tendência de aumento no valor de 0,71%. Esta tendência foi invertida após o início da DAST, onde o valor estimado para VPM foi de -1,24%. Foi verificado, também, que para cada pessoa que morre em um acidente em rodovia federal,

há, em média, 12 outras feridas. Portanto, embora tenha sido verificado uma tendência de redução no número de mortos e feridos, no Brasil, há, ainda, um número elevado de vítimas em acidentes de trânsito.

O estudo realizado por Barroso Junior *et al* (2019) buscou identificar os fatores associados à letalidade dos acidentes de trânsito nas rodovias federais no ano de 2016. A interpretação dos resultados da estimação do modelo indica que as chances, em média, de um acidente ser letal numa rodovia federal são:

- 44% maiores para homens em relação a mulheres;
- 8,49 vezes maiores para os pedestres, 2,71 vezes para os ciclistas, 90% para os ocupantes de motocicletas e 41% para os ocupantes de caminhão, em relação aos ocupantes de automóveis;
- 46% menores para os ocupantes de ônibus em relação aos ocupantes de automóveis;
- 78% maiores para as vítimas de ocorrências na região Nordeste, 58% na região Norte, 44% na região Centro-Oeste e 10% na região Sul, em relação à região Sudeste;
- 35% maiores aos domingos e 18% aos sábados, em comparação à segunda-feira;
- 1,23 vezes maiores durante a madrugada e 40% maiores durante a noite, em relação ao período da manhã;
- 1,29 vezes maiores em curvas e 1,22 em retas, em comparação com acidentes em interseções;
- 1,41 vezes maiores em áreas rurais do que as urbanas;
- Decrescentes no intervalo de zero a 10 anos e crescentes a partir de dez anos, com ápice de letalidade entre os idosos;
- Maiores em rodovias em pistas simples, sendo o tipo de acidente mais letal a colisão frontal, exceto para os atropelamentos de pessoas. Que neste caso a média das probabilidades é maior em pistas duplas.

Comparando as chances de letalidade de duas vítimas de acidentes distintos, com as mesmas características, uma em acidentes com características de contexto de altas probabilidades de óbito e outra com baixas probabilidades, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3. Da mesma forma, foi analisado o impacto das características das vítimas nas probabilidades de morte, conforme apresentado na Tabela 4 (BARROSO JUNIOR; BERTHO; VEIGA, 2019).

Tabela 3 - Razão de chances para a letalidade de vítimas de acidentes nas rodovias federais com características de contexto associadas a probabilidades de morte elevadas e baixas

| Variáveis de contexto dos acidentes | Categorias associadas a: | |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| | Letalidade maior (a) | Letalidade menor (b) |
| Região | Nordeste | Sudeste |
| Tipo de acidente | Colisão Frontal | Colisão traseira |
| Tipo de pista | Pista simples | Pista múltipla |
| Dia da semana | Domingo | Segunda-feira |
| Período do dia | Madrugada | Manhã |
| Geometria da via | Curva | Interseção |
| Uso do solo | Rural | Urbano |
| Razões de chances (a/b) | 160,64 | |

Fonte: BARROSO JUNIOR; BERTHO; VEIGA, 2019

Tabela 4 - Razão de chances para letalidade de vítimas de acidentes nas rodovias federais com características associadas a probabilidade de morte elevadas e baixas

| Variáveis de caracterização das vítimas | Valores associados a: | |
|---|-----------------------|----------------------|
| | Letalidade maior (a) | Letalidade menor (b) |
| Sexo | Masculino | Feminino |
| Idade | 80 anos | 20 anos |
| Condição de envolvimento | Pedestre | Ocupante de ônibus |
| Razões de chances (a/b) | 65,63 | |

Fonte: BARROSO JUNIOR; BERTHO; VEIGA, 2019

Em 2015, o IPEA atualizou a estimativa dos custos dos acidentes de trânsito em rodovias no Brasil com base em pesquisas anteriores, e concluiu, numa estimativa conservadora que estes custas à sociedade cerca de R\$ 40,0 bilhões por ano, e em áreas urbanas o custo é de R\$ 10 bilhões, onde o custo relativo à perda de produção corresponde à maior parte seguido pelos custos hospitalares (IPEA, 2015b).

De acordo com a Pan American Health Organization - PAHO (2019), a região das Américas embora tenha tido algum progresso em relação à legislação de trânsito, ainda apresenta indicadores preocupantes em relação às mortes nos acidentes de trânsito. Os motociclistas, pedestres e ciclistas necessitam de maior atenção, dado que representam 23%, 22% e 3% das mortes, respectivamente. Em 10 países, este grupo representa 60% das mortes no trânsito. Apenas cinco países, na região das Américas, atendem às boas práticas em gestão da velocidade e leis sobre dirigir sob efeito do álcool. Sem esquecer da aplicação da lei em relação ao uso de capacete, cinto de segurança e transporte de crianças. Portanto, as recomendações da OMS são: melhorar a infraestrutura viária, veículos mais seguros, realizar auditorias viárias através da classificação por estrelas, melhorar os serviços hospitalares e de

reabilitação para vítimas, e que os países continuem priorizando a segurança no trânsito como uma questão política.

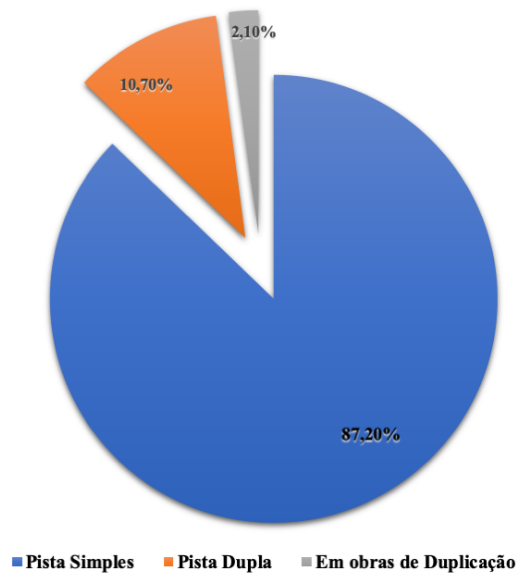
De acordo com a publicação "Gestão de velocidade: um manual de segurança viária para gestores e profissionais da área" (WHO, 2012), a velocidade tem sido identificada como um fator-chave de risco para as lesões causadas pelo trânsito, tendo influência tanto no risco de colisões quanto na gravidade das lesões que delas resultam. As velocidades mais elevadas levam a um maior risco de colisão e uma maior probabilidade de lesões graves. Isto porque, conforme a velocidade aumenta, o mesmo acontece com a distância percorrida durante o tempo de reação do condutor e a distância necessária para parar. Além disso, em alta velocidade, os efeitos dos erros dos condutores são ampliados. Em uma colisão, quanto maior a velocidade, maior a quantidade de energia mecânica (cinética) que deve ser absorvida pelo impacto. Daí, maior a probabilidade de lesões graves.

Segundo García (2008), a consolidação das premissas de que “lesões de trânsito podem ser evitadas” e que “os incidentes não podem ser classificados acidentes”, fortalece a utilização de diversas ferramentas de Análise da Segurança Viária.

2.1 RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

O estudo realizado por COELHO (1999) analisou a influência das características físico-operacionais das vias na ocorrência de acidentes de trânsito nas rodovias federais, onde foram analisadas 20 variáveis. Este estudo concluiu que são nove variáveis que influenciam significativamente os acidentes nas rodovias federais: existência ou não de interseção, meio fio, sarjeta, curva vertical, sinalização vertical, área edificada, tipo de pista (simples ou dupla), traçado (curva ou tangente) e o dia da semana.

A malha rodoviária brasileira é composta por aproximadamente 1.720.700 km de rodovias, incluído rodovias estaduais, municipais e federais. Apenas 12,4% destas são rodovias pavimentadas, totalizando de 213.453 km. Das rodovias pavimentadas, 65.513,3 km são rodovias federais. Destas, 87,2% são em pista simples, 10,7% em pistas duplicadas e 2,1% em obras de duplicação.(CNT, 2019). A Figura 2 ilustra a configuração atual da malha rodoviária federal.



(Fonte: Adaptado –CNT 2019)

Figura 2 - Malha rodoviária federal

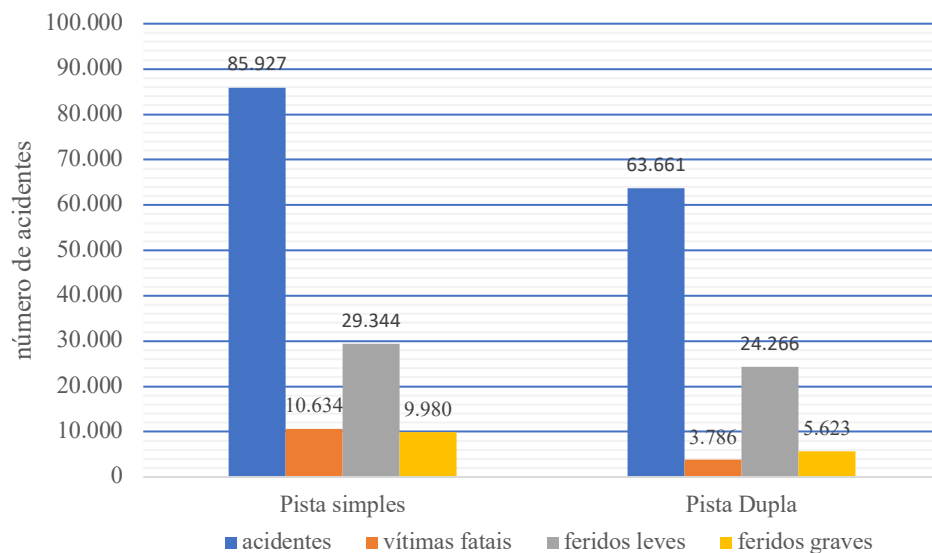
Na análise de acidentes de trânsito ocorridos em rodovias, o tipo de pista é um fator de importância elevada por apresentar uma forte relação com os tipos de acidentes de trânsito que tendem a ocorrer com maior frequência em um dado trecho de rodovia. De acordo com os dados de acidentes disponibilizados pela Polícia Rodoviária Federal – PRF para o ano de 2019 em relação ao tipo de pista, é possível verificar que dos 162.233 acidentes ocorridos, 52,97% (85.927) ocorreram em rodovias de pistas simples, 39,24% (63.661) em pistas duplas e 7,79% (12.645) em pistas mistas. Além disso, se observa que as pistas do tipo simples foram as que apresentaram maior letalidade, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Letalidade dos acidentes de trânsito nas rodovias federais por tipo de pista - 2019

| Tipo de pista | Letalidade |
|----------------------|-------------------|
| Simple | 6,55% |
| Dupla | 2,33% |
| Múltipla | 0,32% |

Fonte: PRF, 2019.

A principal razão desta letalidade é que este tipo de pista não apresenta separador físico entre suas faixas de rolamento, o que segundo Lima et al. (2008) contribui para a maior ocorrência de colisões frontais. A Figura 3 apresenta o número de acidentes por tipo de pista, o número de mortos e o de feridos no ano de 2019.



Fonte: PRF, 2019.

Figura 3 - Acidentes de trânsito nas rodovias federais por tipo de pista - 2019

Em relação ao total de acidentes com mortes ocorridos em rodovias federais no ano de 2019, conforme a base de dados da PRF (2019), ou seja, 14.943 acidentes, é possível verificar que aproximadamente 71,2% dos acidentes com mortes ocorrem em rodovias de pista simples. Em relação ao número de acidentes com feridos leves e graves, em rodovias de pista simples este número representa aproximadamente 52,5% do total de acidentes com feridos ocorridos em rodovias federais neste período.

Já em relação ao tipo de acidente, foi constatado que no ano de 2019, 91,1% das colisões frontais ocorreram em pista simples, com tráfego nos dois sentidos e com ausência de separador físico entre os fluxos opostos. Provavelmente, a ultrapasse indevida contribuiu para muitos destes casos. Salientando que, a colisão frontal é um dos tipos de acidente mais letais junto ao atropelamento (IPEA, 2015a).

A maioria das rodovias de pista simples no Brasil foram construídas nas décadas de 60 e 70, onde a preocupação dos projetistas visava minimizar custos de implantação, aproveitando a topografia e vias existentes para a definição dos traçados. Por esta razão, os traçados destas rodovias apresentam, em trechos localizados ou em extensões mais abrangentes, uma geometria restritiva ou inconsistente (TRENTIN, 2007).

As condicionantes geométricas das rodovias de pistas simples decorrem da definição por norma de valores mínimos e máximos a partir da classificação das rodovias, do relevo e das características do veículo de projeto e, conseqüentemente da determinação da velocidade diretriz. Portanto, os elementos geométricos limites estão relacionados à velocidade diretriz (GARCÍA, 2008).

2.1.1 Geometria da via x velocidade x acidentes

Uma rodovia com geometria inadequada pode ocasionar acidentes, uma vez que os elementos geométricos e de seção transversal, em combinação com as características do tráfego e da área em que a via está inserida, estabelecem um ambiente no qual os condutores escolhem suas velocidades (TORRES, 2015). Vários pesquisadores, entendem que há correlação entre os elementos geométricos e a incidência de acidentes na via. Segundo Lamm et al. (1999), os principais fatores associados a problemas de segurança viária são os descritos a seguir de forma resumida (GARCÍA, 2008).

a) Planimétricas

- existe uma relação inversa entre o raio da curva e taxas de acidente. Curvas com grandes raios apresentam taxas de acidentes significativamente menores que curvas com raios inferiores a 100 metros;
- curvas com raios inferiores a 200 metros apresentam valores equivalentes ao dobro na taxa de acidentes, se comparadas com curvas de raio superior a 400 metros. Para curvas de raios maiores não é possível verificar um decréscimo significativo na taxa de acidentes;
- uma grande variabilidade no raio de curvas consecutivas reduz a segurança viária (curvas desbalanceadas), sendo considerado um dos principais elementos na ocorrência de acidentes;
- a variação da curvatura (função do raio da curva) é tida como o parâmetro predileto, por técnicos e especialistas, para a determinação da velocidade operacional, influenciando significativamente esta;
- o uso de segmentos de clotóides em curvas de transição aumenta a segurança, para raios circulares inferiores a 200 metros, quando confrontados com curvas simples de mesmo raio. Para raios maiores não se verifica este ganho.

b) Altimétricas

- greides com declividade entre 0% e $\pm 2\%$ são os mais seguros;
- greides com declividade de até 6% apresentam um pequeno impacto na segurança, enquanto valores superiores a este são mais propensos a acidentes;
- os declives são mais perigosos que os aclives.

c) Seções transversais

- taxas de acidente decrescem para larguras de faixa de rolamento iguais ou superiores a 3,75 metros;
- taxas de acidente decrescem para acostamentos de 2,50 metros ou superiores (para rodovias com grande VDM) e entre 1,50 e 2,00 metros (baixo VDM).

d) Outras

- acidentes mais graves ocorrem para VDM altos e baixos, reduzindo-se em VDM médios;
- quanto maior o VDM, maior a redução nas taxas de custo de acidentes (podem ocorrer acidentes em maior número mas com menor gravidade);
- quanto maior as distâncias de visibilidade, menor a taxa de acidentes. Altas taxas de acidentes estão registradas a distâncias de visibilidade inferiores a 100 metros. Já para valores superiores a 150 metros não é observada uma relação significativa;
- a taxa de acidentes decresce em rodovias com velocidades de projeto elevadas, definidas em 80 km/h ou mais;
- rodovias com elementos geométricos equilibrados apresentam taxas de acidentes viários mais baixas. Entende-se por elementos geométricos equilibrados a conformação espacial da rodovia que ofereça ao condutor do veículo um padrão de uso sem sobressaltos.

Nos últimos anos tem-se percebido que as mudanças na frota de veículos não se restringem a um aumento de capacidade de carga, sendo observadas também inovações na tecnologia destes veículos, que contribuíram principalmente para um aumento de potência, elevando seu desempenho em termos de velocidade e aceleração. Atualmente a diferença entre o 85º percentil da velocidade dos automóveis e dos caminhões nas rodovias australianas é

menor do que 5%, de forma que não se pode mais assumir a existência de uma compensação do pior desempenho dos veículos de carga nas frenagens e nos trechos em curva. A adoção de parâmetros de geometria com base em veículos de passeio pode, portanto, representar sérios riscos à operação de veículos pesados, devendo ser substituída pela utilização de um veículo de carga para permitir a concepção de vias seguras (PEREIRA NETO, 2007).

2.2 VEÍCULOS DE CARGA

Em decorrência de sucessivos incentivos governamentais, os quais tiveram seu ápice na segunda metade da década de 1950, durante o governo do presidente Juscelino Kubitschek, o transporte rodoviário é protagonista no Brasil e que se estendem até os dias de hoje. Em paralelo à popularização do transporte rodoviário no país, deu-se também um crescimento no volume de acidentes de trânsito, o que tornou a questão um importante problema de saúde pública. Apesar de uma série de esforços na área de legislação de trânsito terem sido realizados para combater este problema, estes se mostraram insuficientes (BARROSO JUNIOR, 2018)

O transporte no Brasil, principalmente o de cargas, é predominantemente rodoviário e a matriz de transportes brasileira é tida como desbalanceada. Segundo dados do Ministério dos Transportes (2012), 52% dessa matriz é representada pelo modo rodoviário, 30% pelo ferroviário, 8% pela cabotagem, 5% pelo hidroviário e 5% pelo dutoviário. O transporte de carga pelo modal rodoviário está com um valor elevado quando comparado com o de países com as mesmas dimensões, como Rússia (8%) e Estados Unidos (32%).

Segundo o Relatório Final do Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT (2012), a malha rodoviária pavimentada continuou sendo incrementada, e aumentou 43% entre 1996 e 2011. Considerado o mesmo intervalo temporal, a rede ferroviária em atividade no país, mesmo com a revitalização decorrente da concessão à iniciativa privada da operação de grande parte da malha para transporte de cargas, continuou estacionada em torno dos 30 mil quilômetros.

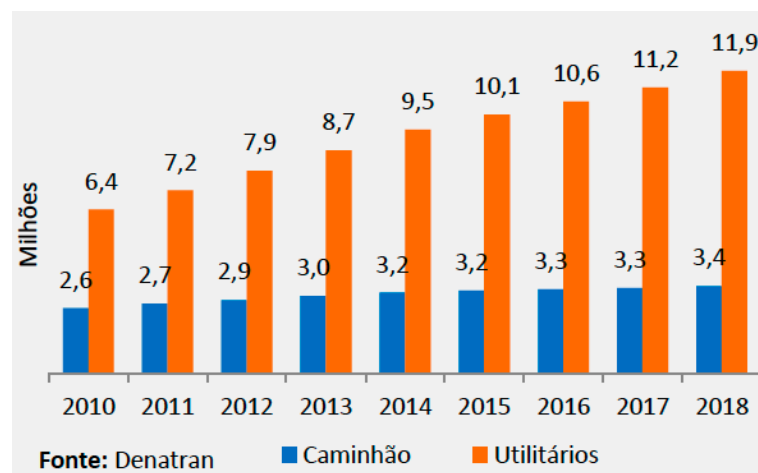
De acordo com o Relatório Corredores Logísticos Estratégicos - Volume I - MTPA (2017), em relação à infraestrutura federal disponível, percebe-se que os Corredores Logísticos Estratégicos para exportação utilizam cerca de um quarto de cada modo de transporte dessa malha. Assim, caso o Governo pretenda priorizar o escoamento do complexo de soja e milho, necessitará realizar investimentos em aproximadamente 25% da malha federal disponível.

Delimitando a análise para a infraestrutura rodoviária federal, foi verificado que nos corredores de exportação 97% das vias são pavimentadas, sendo 11% duplicadas, e apenas 3% não têm pavimento. Portanto, a maior parte das cargas é transportada por rodovias de pistas simples, o que gera um grande volume de veículos de cargas nas rodovias.

2.2.1 Representatividade na frota brasileira

O Diagnóstico Logístico 2010-2018 - EPL-ONLT (2018) aponta que, em 2018, a frota de veículos circulante no país chegou a casa dos 100,7 milhões. Verificou-se um aumento de 3,4% em 2018 da frota de automóveis no Brasil, índice levemente superior na comparação com o ano de 2017, quando o acréscimo foi de 3,2%.

Ainda neste relatório, verifica-se que a frota de veículos utilitários continua com uma boa performance quando comparada aos caminhões que, após apresentar uma estagnação no período de 2016 a 2017, experimentou uma evolução positiva, refletindo uma melhoria no desempenho do setor, conforme Figura 4.



Fonte: EPL-ONLT, 2018.

Figura 4 - Frota de caminhões e utilitários

O segmento de ônibus e tratores têm apresentado pouca evolução, quando comparado ao período inicial da série histórica. Nos últimos 3 anos, a média de crescimento de ônibus foi de apenas, respectivamente, 2,0% e 1,7%, enquanto que entre 2010 e 2012 esses índices atingiram 7,1% e 9,4%. Tal crescimento pode ser reflexo do baixo desempenho da economia brasileira, sobretudo a partir do ano de 2014.

2.2.2 Veículos de carga x acidentes

De acordo com o estudo realizado por Minervi (2013), foram identificados nove fatores como mais importantes na análise dos acidentes, quer por sua maior carga fatorial e pela importância da variável, de acordo com a interpretação para a nomeação dos fatores, são eles: “Ingestão de álcool” (FATOR I), “Carga” (espécie do veículo) (FATOR II), “Chuva” (FATOR III), “Atropelamento de pessoa” (FATOR IV), “Nevoeiro/Neblina” (FATOR V), “Anoitecer” (FATOR VI), “Colisão com bicicleta” (FATOR VII), “Animais na pista” (FATOR VIII) e “Não guardar distância de segurança” (FATOR IX). O segundo fator mais relevante identificado está relacionado diretamente com a presença dos veículos de carga nas rodovias federais.

No estudo sobre a letalidade dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras realizado por Barroso Junior (2018), a letalidade dos acidentes com vítimas ocupantes de caminhão é a terceira maior dentre todas as categorias de envolvimento consideradas no estudo, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Letalidade dos acidentes de trânsito ocorridos nas rodovias federais por condição de envolvimento das vítimas - Brasil, 2016

| Condição de envolvimento | Letalidade |
|--------------------------|------------|
| Pedestre | 25,8% |
| Ciclista | 13,4% |
| Ocupante de caminhão | 8,4% |
| Ocupante de automóvel | 6,3% |
| Ocupante de motocicleta | 5,8% |
| Ocupante de ônibus | 4,3% |
| Outros | 7,5% |

Fonte: PRF, 2016.

Uma das causas mais relevantes na fatalidade dos acidentes nas rodovias brasileiras é o fato de dormir na direção. Esta causa foi mais frequente entre os ocupantes de ônibus e caminhões no período de 2016, como mostra a Tabela 7. Estes resultado é esperado, pois estes motoristas profissionais tendem a ser mais suscetíveis à sonolência em razão de desgastantes jornadas de trabalho (BARROSO JUNIOR, 2018).

Tabela 7 - Distribuição percentual das vítimas fatais de acidentes de trânsito ocorridos nas rodovias federais, por condição de envolvimento e causa do acidente - Brasil, 2016

| Condição de envolvimento | Causa do acidente | |
|--------------------------|---------------------|---------------|
| | Dormindo na direção | Outras causas |
| Ocupante de ônibus | 14,4% | 85,6% |
| Ocupante de caminhão | 10,5% | 89,5% |
| Ocupante de automóvel | 6,9% | 93,1% |
| Ocupante de motocicleta | 1,4% | 98,6% |
| Outros | 0,3% | 99,7% |

Fonte: PRF, 2016.

2.3 PERFIS DE VELOCIDADE

A utilização das velocidades operacionais e de projeto tem sido proposta e implementada em vários países quando se trata da análise de consistência de traçado (TRENTIN, 2007).

Os perfis de velocidade representam a variação da velocidade diretriz ou da velocidade operacional ao longo das vias. É um dos dados mais relevantes para a análise de segurança viária, em particular, para a análise da consistência geométrica. Para construir os perfis de velocidade, é necessário usar modelos que possibilitem correlacionar a velocidade operacional com as características geométricas da rodovia (ECHAVEGUREN; DÍAZ, 2014).

A consistência geométrica pode ser explicada na relação entre os agentes do sistema viário: a rodovia, o veículo e condutor. Pode ser definida como o quanto bem uma rodovia é projetada para se adaptar às expectativas do motorista e evitar manobras críticas que podem levar ao risco de colisão. Portanto, um traçado é considerado não consistente se apresenta mudanças inesperadas que podem surpreender o condutor, levando a executar manobras que poderão ocasionar acidentes (CASTRO et al., 2008; CAMACHO TORREGROSA et al., 2013)

Muitos estudos tem sido desenvolvidos com diferentes critérios para analisar a consistência geométrica, as quatro abordagens principais são baseadas: na velocidade operacional, nos índices do traçado (indicadores da qualidade do traçado: como raio médio, taxa de mudança de curvatura, inclinação longitudinal média, etc.), na estabilidade do veículo e na carga de trabalho do condutor (PÉREZ ZURIAGA et al., 2011).

Entre estas diferentes medidas existentes, a abordagem da velocidade operacional pode ser nomeada como a medida mais eficiente e quantitativa. Esta análise é baseada no perfil de velocidades, os quais são utilizados para determinar inconsistências ao longo dos alinhamentos do traçado. Nesta abordagem, a consistência geométrica é avaliada com base em dois critérios diferentes ou numa combinação de ambos: o primeiro se dá através da diferença entre a velocidade de dois segmentos sucessivos de uma rodovia, e a segunda, entre a diferença da velocidade operacional e os valores da velocidade diretriz para um segmento específico da rodovia. Se a diferença de velocidade entre os dois segmentos sucessivos ou a diferença entre os valores de velocidade operacional e diretriz forem maiores que um determinado valor, o segmento será considerado inconsistente. Portanto, o primeiro passo na avaliação da consistência do projeto é o desenvolvimento de modelos estatísticos que podem prever a

velocidade operacional ou o diferencial de velocidade entre os dois segmentos, com base nas características geométricas e de tráfego da rodovia, tais como o raio, o greide, o tráfego diário etc. (MISAGHI; HASSAN, 2005).

A velocidade operacional é um parâmetro de resposta dos condutores, por este motivo este dado não é conhecido no momento da elaboração do projeto. Possui uma relação profunda com a questão da segurança. Estudos demonstram que motoristas dirigindo a velocidades superiores ao 85º percentil apresentam maior envolvimento em acidentes do que aqueles que conduzem com velocidades até deste valor (DER/SP, 2006).

É possível estimar o comportamento da velocidade operacional através de modelos de estimativa. Conhecer a velocidade operacional num segmento de uma via e como varia ao longo da mesma, é de grande importância para diferentes análises que envolvam o comportamento do condutor no fluxo de tráfego. Sendo assim a velocidade operacional, estimada por modelos, tem diferentes aplicações, além da análise da consistência geométrica, como input de softwares de modelagem de tráfego e em estudos para a definição da velocidade limite.

Para conhecer a velocidade operacional em cada segmento do projeto, podemos coletar medidas de campo ou estimar através do perfil de velocidades (GARACH MORCILLO, 2014). A Figura 5 representa um perfil de velocidade operacional ao longo de uma estrada.

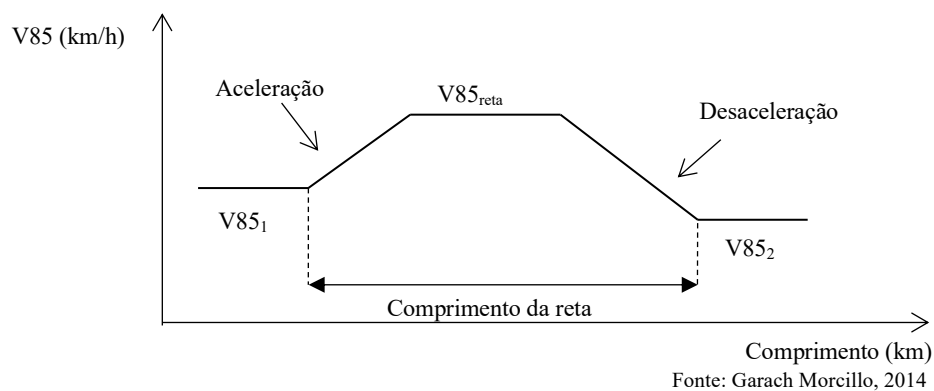


Figura 5 - Perfil de Velocidade

2.3.1 Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional

Diversos modelos que estimam a velocidade operacional. Desde 1954, pesquisadores investigam o comportamento da V_{85} . A maioria destes relacionam a velocidade operacional com as características geométricas do alinhamento. Existem modelos para estimar a velocidade operacional em curvas e em tangentes. A estrutura do modelo, as variáveis independentes e os coeficientes de determinação são diferentes de um modelo para outro, em função da diferença de comportamento dos condutores de uma região para outra (CASTRO et al., 2008).

Existem diferentes modelos de estimativa de velocidade operacional, onde a principal classificação é que podem ser discretos ou contínuos. Os modelos contínuos são aplicáveis a segmento específico (uma curva horizontal ou uma tangente) e que forneça o valor da velocidade para este segmento específico. Os modelos contínuos se aplicam a trechos compostos por diferentes alinhamentos concatenados (PÉREZ ZURIAGA et al., 2011).

Muitos modelos usam uma única variável, onde a mais usual é o raio das curvas circulares (R) ou o grau de curvatura (DC), pois são obtidas expressões simples com uma boa correlação. Alguns pesquisadores usam outras variáveis, como a taxa de variação de curvatura (CCR), ou a deflexão angular (DF), largura de pista, largura de acostamento, entre outros. (MISAGHI; HASSAN, 2005; CASTRO et al., 2008).

2.3.1.1 Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional em Curvas

A maioria das pesquisas realizadas estabelece uma relação entre a velocidade operacional e elementos discretos que estão focados nas curvas, e estabeleceram modelos com maior correlação. Estes modelos consideram como hipótese inicial que a velocidade é constante ao longo de toda curva horizontal. Além disso, tanto a velocidade utilizada para calibrar o modelo como a para estimar é geralmente a do ponto central da curva, considerada a velocidade mínima da curva. Estas hipóteses podem não ser totalmente verdadeiras, mas os erros cometidos não são excessivamente grandes, por este motivos esses procedimentos geralmente são admitidos (PÉREZ ZURIAGA et al., 2011).

A

Tabela 8 apresenta a relação de modelos para a estimativa da velocidade operacional em curva horizontais onde as variáveis consideradas são o raio ou o grau de curvatura.

Tabela 8 - Modelos para V85 dependentes do raio ou do grau de curvatura

| Autor | Ano | País | Modelo | R² |
|---------------------|------------|-------------|--|----------------------|
| Taragin | 1954 | E.U.A | $v_{85} = 88,87 - \frac{2554,76}{R}$ | 0,86 |
| McLean | 1981 | Austrália | $v_{85} = 101,2 - \frac{2730}{R}$ | 0,87 |
| Glennon et al. | 1986 | E.U.A | $v_{85} = 103,96 - \frac{4524,94}{R}$ | 0,84 |
| Lamm y Choueiri | 1986 | E.U.A | $v_{85} = 94,39 - \frac{3189,94}{R}$ | 0,79 |
| Lamm et al. | 1988 | E.U.A | $v_{85} = 94,398 - \frac{3188,656}{R}$ | 0,79 |
| Kanellaidis et al. | 1990 | Grécia | $v_{85} = 109,09 - \frac{3837,55}{R}$ | 0,647 |
| Kanellaidis et al. | 1990 | Grécia | $v_{85} = 129,88 - \frac{623,1}{\sqrt{R}}$ | 0,777 |
| Ottesen | 1993 | E.U.A | $v_{85} = 103,64 - \frac{3400,73}{R}$ | 0,80 |
| Ottesen y Krammes | 1994 | E.U.A | $v_{85} = 103,70 - \frac{3403}{R}$ | 0,80 |
| Morrall y Talarico | 1994 | Canadá | $v_{85} = e^{4,564 - 0,00586 \cdot DC}$ | 0,631 |
| Islam y Seneviratne | 1994 | E.U.A | $v_{85} = 103,03 - \frac{4208,76}{R} - \frac{36597,92}{R^2}$ | 0,98 |
| Krammes et al. | 1995 | E.U.A | $v_{85} = 103,66 - 1,95 \cdot DC$ | 0,787 |
| Lamm et al. | 1999 | E.U.A | $v_{85} = 95,594 - 1,597 \cdot DC$ | 0,787 |
| Pasetti y Fambro | 1999 | E.U.A | $v_{85} = 103,90 - \frac{3020,50}{R}$ | 0,680 |
| Ottesen y Krammes | 2000 | E.U.A | $v_{85} = 103,66 - 1,95 \cdot DC$ | 0,80 |
| Castro et al. | 2008 | Espanha | $v_{85} = 120,16 - \frac{5596,72}{R}$ | 0,75 |

Fonte: Pérez Zuriaga et.al., 2011

Onde:

 R : raio (m) DC : grau de curvatura (graus)

Outros estudos desenvolveram modelos semelhantes, porém consideram outras variáveis, tais como, largura de pista, inclinação do greide, curvas verticais, entre outros. Estes modelos estão relacionados na Tabela 9.

Tabela 9 - Modelos para V85 dependentes do raio ou do grau de curvatura considerando outras variáveis

| Autor | Ano | País | Modelo | Condicionantes | R² |
|---------------------|------------|-------------|--|-------------------------|----------------------|
| Lamm y Choueiri | 1987 | E.U.A | $v_{85} = 89,55 - \frac{2862,69}{R}$ | LW=3,0 m | 0,75 |
| Lamm y Choueiri | 1987 | E.U.A | $v_{85} = 93,83 - \frac{2955,40}{R}$ | LW=3,3 m | 0,74 |
| Lamm y Choueiri | 1987 | E.U.A | $v_{85} = 96,15 - \frac{2803,7}{R}$ | LW=3,6 m | 0,82 |
| Islam y Seneviratne | 1994 | E.U.A | $v_{85} = 95,41 - 1,48 \cdot DC - 0,012 \cdot DC^2$ | Início curva | 0,99 |
| Islam y Seneviratne | 1994 | E.U.A | $v_{85} = 103,30 - 2,41 \cdot DC - 0,029 \cdot DC^2$ | Meio da curva | 0,98 |
| Islam y Seneviratne | 1994 | E.U.A | $v_{85} = 96,11 - 1,07 \cdot DC$ | Final da curva | 0,98 |
| Fitzpatrick et al. | 1996 | E.U.A | $v_{85} = 102,10 - \frac{3077,13}{R}$ | $-9\% \leq G < -4\%$ | 0,58 |
| Fitzpatrick et al. | 1996 | E.U.A | $v_{85} = 105,98 - \frac{3709,90}{R}$ | $-4\% \leq G < 0\%$ | 0,58 |
| Fitzpatrick et al. | 1996 | E.U.A | $v_{85} = 104,82 - \frac{3574,51}{R}$ | $0\% \leq G < 4\%$ | 0,76 |
| Fitzpatrick et al. | 1996 | E.U.A | $v_{85} = 96,61 - \frac{2752,19}{R}$ | $4\% \leq G < 9\%$ | 0,53 |
| Fitzpatrick et al. | 1996 | E.U.A | $v_{85} = 105,32 - \frac{3438,19}{R}$ | Concordância côncava | 0,92 |
| Fitzpatrick et al. | 1996 | E.U.A | $v_{85} = 103,24 - \frac{3576,51}{R}$ | Concordância convexa | 0,74 |
| Fitzpatrick et al. | 2000 | E.U.A | $v_{85} = 106,30 - \frac{3595,29}{R}$ | $0\% \leq G < 4\%$ | 0,92 |
| Fitzpatrick et al. | 2000 | E.U.A | $v_{85} = 96,46 - \frac{2744,49}{R}$ | $4\% \leq G < 9\%$ | 0,56 |
| Fitzpatrick et al. | 2000 | E.U.A | $v_{85} = 100,87 - \frac{2720,78}{R}$ | $-9\% \leq G < 0\%$ | 0,59 |
| Fitzpatrick et al. | 2000 | E.U.A | $v_{85} = 101,90 - \frac{3283,01}{R}$ | Concordância convexa | 0,78 |

Fonte: Pérez Zuriaga et.al., 2011

Onde:

R: raio (m)*DC*: grau de curvatura (graus)*LW*: largura da pista*G*: greide

Também existem modelos mais complexos que incluem outras variáveis, tais como o ângulo da deflexão, o comprimento da curva, e, até, variáveis não geométricas, tal como a velocidade na tangente anterior. A Tabela 10 apresenta a relação dos modelos mais conhecidos com diversas variáveis.

Tabela 10 - Modelos para V85 para curvas dependentes de várias variáveis

| Autor | Ano | País | Modelo | R ² |
|-------------------------|------|-------------|---|----------------|
| McLean | 1981 | Austrália | $v_{85} = 53,80 + 0,464 \cdot v_F - \frac{3260}{R} + \frac{85000}{R^2}$ | 0,92 |
| Kerman et al. | 1982 | Reino Unido | $v_{85} = v_a - \frac{v_a^3}{398 \cdot R}$ | 0,91 |
| Setra | 1986 | França | $v_{85} = (102/1 + 346/(57.300/CCR) \wedge (-1,5))$ | N/A |
| Lamm y Choueiri | 1987 | E.U.A | $v_{85} = 93,85 - 0,045 \cdot CCR$ | 0,787 |
| Lamm y Choueiri | 1987 | E.U.A | $v_{85} = 55,84 - \frac{2809,32}{R} + 0,634 \cdot LW + 0,053 \cdot SW + 0,0004 \cdot IMD$ | 0,842 |
| Lamm y Choueiri | 1987 | E.U.A | $v_{85} = 95,6 - 0,04866667 \cdot CCR$ | 0,82 |
| Kanellaidis et al. | 1990 | Grécia | $v_{85} = 102,44 \frac{274,81}{R} + 0,012 \cdot L_C - 0,10 \cdot I$ | 0,82 |
| Ottesen y Krammes | 1994 | E.U.A | $v_{85} = 103,04 - 0,0477 \cdot CCR$ | 0,80 |
| Krammes et al. | 1995 | E.U.A | $v_{85} = 102,45 - 1,57 \cdot DC + 0,0037 \cdot L_C - 0,10 \cdot DF$ | 0,82 |
| Krammes et al. | 1995 | E.U.A | $v_{85} = 41,62 - 1,29 \cdot DC + 0,00049 \cdot L_C - 0,12 \cdot DF + 0,95 \cdot v_r$ | 0,90 |
| Lamm et al. | 1995 | Alemanha | $v_{85} = \frac{10^6}{10150,1} + 7676 \cdot CCR$ | 0,81 |
| Choueiri et al. | 1995 | Líbano | $v_{85} = 91,03 - 0,056 \cdot CCR$ | 0,81 |
| Voigt | 1996 | E.U.A | $v_{85} = 99,61 - \frac{2951,37}{R} + 0,014 \cdot L_C - 0,13 \cdot DF + 71,82 \cdot e$ | 0,84 |
| McFadden y Elefteriadou | 1997 | E.U.A | $v_{85} = 41,62 - 1,29 \cdot DC + 0,0049 \cdot L_C - 0,12 \cdot DF + 0,95 \cdot v_r$ | 0,90 |
| Lamm et al. | 1999 | E.U.A | $v_{85} = e^{4,561 - 0,000588888 \cdot CCR}$ | 0,63 |
| Ottesen y Krammes | 2000 | E.U.A | $v_{85} = 102,44 - 1,57 \cdot DC - 0,012 \cdot L_C - 0,01 \cdot DC \cdot L_C$ | 0,81 |
| McFadden y Elefteriadou | 2000 | E.U.A | $85 \text{ MSR} = -14,90 + 0,144 \cdot v_T - \frac{954,55}{R} + 0,0153$ | 0,71 |
| McFadden y Elefteriadou | 2000 | E.U.A | $85 \text{ MSR} = -0,812 + 0,812 + \frac{998,12}{R} + 0,017 \cdot L_T$ | 0,60 |
| Crisman et al. | 2005 | Itália | $v_{85} = 48,447 - \frac{4995,01}{R} + \frac{163893,24}{R^2} + 0,5598 \cdot v_a$ | 0,88 |

Fonte: Pérez Zuriaga et.al., 2011

Onde:

 R : raio (m) L_C : extensão da curva (m) CCR : curvasidade (°/km) DC : grau de curvatura (graus) DF : deflexão (graus) L_T : extensão da reta anterior (m) LW : largura da pista (m) SW : largura do acostamento (m) LW : largura da pista G : greide I : fluxo médio diário (veic/dia) v_a : velocidade desejada (km/h)

v_T : 85 percentil da velocidade da reta anterior (km/h)

v_F : 85 percentil da velocidade em reta baseada na velocidade diretriz (km/h)

Todos estes modelos têm como resultado um único valor da estimado da velocidade operacional na curva. Existem outros modelos que não consideram a velocidade constante ao longo da curva, como os modelos de Islam e Seneviratne (1994) e de Gibreel et al. (2001). Neste último, foi possível desenvolver um perfil pseudocontínuo da velocidade operacional nas curvas (PÉREZ ZURIAGA et al., 2011).

Outros estudos não se concentraram apenas no percentil 85, e procuraram estimar os percentis 50,85 e 95, como foi a pesquisa realizada por Jessen et al. (2001).

No Brasil, García (2002) desenvolveu um modelo de estimativa de velocidade tendo como única variável o raio (R). No seu estudo, dos oito modelos considerados válidos, por apresentarem estatísticas t acima do t crítico de Student e coeficientes de determinação altos, foi adotado apenas um. O modelo apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,59. A equação obtida foi:

$$v_{85} = 90,785 - \frac{1975,105}{R}$$

Ampliando a abrangência dos modelos anteriormente estudados, García (2008) inseriu variáveis independentes, tais como: valor absoluto da declividade, *dummy* lado e *dummy* aclave, resultando num novo modelo. Este apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,5470. A equação obtida foi:

$$v_{85} = 93,1545 - \frac{1666,1716}{R} - 1,1872 \times L - 1,3426 \times A$$

Onde:

R: raio (m)

L = *dummy* lado (1 – esquerda, 0 – direita ou sem curva)

I = declividade (%)

A = *dummy* aclave (1 – aclave, 0 – declive ou nível)

Castro et al. (2008) utilizou SIG em estudo realizado na Espanha para desenvolver um modelo de estimativa de velocidade operacional em curva. A amostra utilizada foi de 18 elementos, e teve como variável apenas o raio (R).

Bonneson e Pratt (2009) desenvolveram um modelo que considera veículos leves e pesados. Se baseia na hipótese que o condutor varia o atrito transversal na intenção de manter

sua segurança na viagem. No estudo foi considerado headway de 7 segundos para veículos leves e 3 segundos para veículos pesados.

2.3.1.2 Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional em Tangentes

De acordo com a literatura, é mais complexo e menos preciso estimar a velocidade operacional em retas. Pois não há aceleração lateral para compensar e o risco de sair da pista não faz parte da decisão dos condutores no momento de decidir a velocidade (PÉREZ ZURIAGA et al. 2011). Os critérios de decisão da velocidade são outros, e podem estar relacionados a diferentes fatores como o entorno das rodovias, o fluxo existente, a geometria do trecho, entre outros. Por estes motivos, os modelos de estimativa de velocidade operacional em reta apresentam, via de regra, menor coeficientes de determinação do que os em curvas.

Os estudos de velocidade em retas podem ser em retas independentes ou não independentes. As primeiras são retas com extensão suficientemente longas para os condutores alcançarem a velocidade desejada, as segundas são de menor extensão onde o caráter geométrico interfere no desenvolvimento da velocidade.

Alguns modelos em retas independentes possuem apenas um valor estático para qualquer reta. Os modelos mais conhecidos estão relacionados na Tabela 11.

Tabela 11 - Modelos estáticos para V85 em tangentes

| Autor | Ano | País | Modelo |
|-----------------------|------------|-------------|---------------------------------|
| Ottesen y Krammes | 2000 | E.U.A | $v_T = 97,9 \text{ km/h}$ |
| Fitzpatrick y Collins | 2000 | E.U.A | $v_T = 100 \text{ km/h}$ |
| Easa | 2003 | Canadá | $v_T \in [94,104] \text{ km/h}$ |

Fonte: Pérez Zuriaga et.al., 2011

Outros estudos foram realizados com a intenção de estimar a velocidade operacional em tangentes em função de outras variáveis. Polus et al. (2000) desenvolveram modelos onde a variável crítica era a extensão da reta. Outras variáveis também foram consideradas importantes, tais como: a velocidade máxima, os raios das curvas anterior e posterior, largura da pista, greide, etc. Neste estudo foi definida uma nova variável – *geometric measure (GM)*, a qual possui expressões diferentes para retas curtas e longas, sendo a unidade em m^2 . Para retas curtas, esta variável é medida pela média dos raios da curva anterior e posterior à reta curta em análise. Em retas longas, a variável é determinada pelo produto da extensão da reta com a raiz

quadrada do produto dos raios da curva anterior e posterior à reta analisada, sendo o resultado dividido por 100.

Os modelos obtidos foram divididos em 4 grupos, em função das características dos raios das curvas e extensão das retas. Os grupos são:

- Grupo 1: raios pequenos e intertangente curta. Tanto a curva anterior como a posterior possuem raios menor ou igual a 250m com intertangente inferior a 150m;
- Grupo 2: raios pequenos e intertangente intermediária. Os raios de cada curva são menores ou igual a 250m com o valor da intertangente entre 150m e 1000m. Para ser considerado neste grupo o valor de GM_L deve ser no máximo 1500;
- Grupo 3: raios intermediários e intertangente intermediária. Os raios de cada curva são maiores do que 250m com intertangente entre 150m e 1000m. Para ser considerado neste grupo o valor de GM_L deve ser no mínimo 1500 e no máximo 7500;
- Grupo 4: intertangente longa para qualquer raio razoável. A extensão da intertangente deve ser maior que 1000m e os raios não devem ser fora de norma.

Os modelos destes grupos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Modelos para V85 em tangentes por Grupo

| Grupo | Modelo | R ² |
|---------|---|----------------|
| Grupo 1 | $v_{85} = 101,11 - \frac{3420}{GM_S}$ | 0,553 |
| Grupo 2 | $v_{85} = 98,405 - \frac{3184}{GM_L}$ | 0,684 |
| | $v_{85} = 105,00 - \frac{28,107}{e^{0,00108 \cdot GM_L}}$ | 0,742 |
| Grupo 3 | $v_{85} = 97,73 - 0,00067 \cdot GM$ | 0,2 |
| Grupo 4 | $v_{85} = 105,00 - \frac{22,953}{e^{0,00012 \cdot GM_L}}$ | 0,838 |

Fonte: Polus et al., 2000

Onde:

GM_S : geometric measure para retas curtas (m²)

GM_L : geometric measure para retas longas (m²)

2.3.1.3 Modelos de Estimativa da Velocidade Operacional considerando veículos de carga

Existem diversos modelos para estimativa de velocidade operacional em rodovias de pista simples considerando os veículos de passeio (conforme seções anteriores), porém há poucos modelos para a previsão da velocidade operacional de veículos de carga.

Alguns estudos têm sido realizados para analisar a diferença da velocidade entre veículos de passeio e os veículos de carga. Segundo Harwood et al. (2003), essa diferença da velocidade causa inconsistências na operação dos veículos nos aclives. De acordo com Leisch e Leisch (1977), esta diferença pode ser na ordem de até 15 km/h.

Misaghi e Hassan (2005) realizaram um estudo para investigar o comportamento dos motoristas em relação à velocidade em curvas horizontais nas rodovias de pistas simples do Canadá. Concluíram que a velocidade dos veículos de passeio apresenta valor similar aos veículos de carga pequenos, porém apresenta diferença significativa entre os veículos de carga mais pesados. Como o número de observações dos veículos de carga pesados foi pequeno num período de 24 horas, o desenvolvimento do modelo de estimativa de velocidade operacional para caminhões pesados foi abortado neste estudo.

O estudo realizado por Donnell et al. (2001) desenvolveu diversos modelos de estimativa de velocidade operacional para veículos pesados ao longo de curvas horizontais em rodovias de pistas simples, utilizando a combinação de dados de campo e dados simulados com o software TWOPAS. Na simulação, o raio contribuiu para a diminuição da velocidade dos veículos de passeio, e o greide teve mais efeito nas velocidades dos veículos pesados. Constataram que os perfis de velocidades dos veículos de passeio e dos veículos pesados mostram as mesmas tendências, tanto no campo como na simulação, e que as velocidades dos caminhões são um pouco menores do que as dos veículos de passeio. A Tabela 13 apresenta os modelos de estimativa da velocidade operacional para caminhões ao longo de uma curva horizontal.

Tabela 13 - Modelos V85 para caminhões ao longo de uma curva

| Localização | Modelo | R ² |
|-------------|--|----------------|
| PC200 | $v_{85} = 51,5 + 0,137R - 0,779 \cdot GAPT + 0,0127 \cdot LAPT - 0,000119(LAPT \cdot R)$ | 0,622 |
| PC150 | $v_{85} = 54,9 + 0,123R - 1,07 \cdot GAPT + 0,0078 \cdot LAPT - 0,000103(LAPT \cdot R)$ | 0,627 |
| PC100 | $v_{85} = 56,1 + 0,117R - 1,15 \cdot GAPT + 0,0060 \cdot LAPT - 0,000097(LAPT \cdot R)$ | 0,613 |
| PC50 | $v_{85} = 78,7 + 0,0347R - 1,30 \cdot GAPT + 0,0226 \cdot LAPT$ | 0,552 |
| PC | $v_{85} = 78,4 + 0,0140R - 1,40 \cdot GDEP + 0,00724 \cdot LDEP$ | 0,562 |

| | | |
|-------|--|-------|
| QP | $v_{85} = 75,8 + 0,0176R - 1,41 \cdot GDEP + 0,0086 \cdot LDEP$ | 0,600 |
| MP | $v_{85} = 75,1 + 0,0176R - 1,48 \cdot GDEP + 0,00836 \cdot LDEP$ | 0,600 |
| 3QP | $v_{85} = 74,7 + 0,0176R - 1,59 \cdot GDEP + 0,00814 \cdot LDEP$ | 0,611 |
| PT | $v_{85} = 74,5 + 0,0176R - 1,69 \cdot GDEP + 0,00810 \cdot LDEP$ | 0,611 |
| PT50 | $v_{85} = 82,8 - 2,00 \cdot GDEP - 0,00925 \cdot LDEP$ | 0,564 |
| PT100 | $v_{85} = 83,1 - 2,08 \cdot GDEP - 0,00934 \cdot LDEP$ | 0,577 |
| PT150 | $v_{85} = 83,6 - 2,29 \cdot GDEP - 0,00919 \cdot LDEP$ | 0,604 |
| PT200 | $v_{85} = 84,1 - 2,34 \cdot GDEP - 0,00944 \cdot LDEP$ | 0,607 |

Fonte: Donnell et al., 2000

Onde:

R : raio (m)

$GAPT$: grade da tangente de entrada;

$LAPT$: extensão da tangente de entrada (m);

$GDEP$: grade da tangente de saída;

$LDEP$: extensão da tangente de saída (m);

Jacob e Anjaneyulu (2013) estudaram, nas rodovias de pistas simples da Índia, os perfis de velocidade operacional para diferentes classes de veículos, ou seja, veículos de passeio, motocicletas, ônibus e caminhões). Concluíram que a velocidade operacional em curvas horizontais nas rodovias de pistas simples é influenciada significativamente pelo comprimento da tangente de aproximação, pelo raio e pela extensão da curva. O efeito destes fatores é diferente para as diferentes classes de veículos. Os modelos encontrados para a estimativa da velocidade operacional no meio estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Modelos para V85 no meio da curva

| Tipo de veículo | Modelo | R ² |
|--------------------|---|----------------|
| Veículo de passeio | $v_{85} = 69,00 - \left(\frac{1005,39}{R}\right) - 0,065 \times CL$ | 0,80 |
| Motocicletas | $v_{85} = 67,00 - \left(\frac{1105,72}{R}\right) - 0,069 \times CL$ | 0,82 |
| Ônibus | $v_{85} = 70,20 - \left(\frac{1169,68}{R}\right) - 0,099 \times CL$ | 0,83 |
| Caminhão | $v_{85} = 63,20 - \left(\frac{1063,82}{R}\right) - 0,061 \times CL$ | 0,84 |
| Todos os veículos | $v_{85} = 65,00 - \left(\frac{1009,39}{R}\right) - 0,053 \times CL$ | 0,86 |

Fonte: Jacob e Anjaneyulu (2013)

Onde:

R : raio (m)

CL : comprimento da curva (m)

Grande parte dos pesquisadores concluiu que os perfis de velocidade dos veículos de passeio podem ser baseados principalmente na planimetria, porém os perfis de velocidade do veículos pesados dependem da planimetria e da altimetria. Portanto, a análise das diferenças da velocidade de operação entre veículos de passeio e veículos de carga devem ser realizados considerando efeitos geométricos tridimensionais (LLOPIS-CASTELLÓ et al., 2018).

Llopis-Castelló et al. (2018) realizaram pesquisa que analisa as velocidades dos veículos pesados em curvas horizontais de rodovias de pistas simples na Espanha baseadas em perfis contínuos de velocidades coletados por dispositivos de rastreamento com GPS. O estudo identificou o efeito combinado entre o alinhamento horizontal e vertical na velocidade dos veículos pesados, além disso foi observado comportamentos distintos para os veículos carregados e não carregados. A influência do greide foi identificada apenas nos aclives, sendo que a influência é maior para os veículos carregados. Os modelos obtidos para a velocidade operacional neste estudo estão apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Modelos para V85 para caminhões carregados e não carregados

| Tipo de veículo pesado | Modelo | R^2_{Adj} |
|------------------------|---|-------------|
| Carregado | $v_{85L} = \begin{cases} 75,96 - \frac{44,56}{e^{0,00685 \cdot R}} & \text{if } g \leq 4,23\% \\ 75,96 - \frac{44,56}{e^{0,00685 \cdot R}} - 5,06 \cdot (g - 4,23) & \text{if } g > 4,23\% \end{cases}$ | 0,73 |
| Não carregado | $v_{85U} = \begin{cases} 85,02 - \frac{60,62}{e^{0,01240 \cdot R}} & \text{if } g \leq 3,19\% \\ 85,02 - \frac{60,62}{e^{0,01240 \cdot R}} - 1,95 \cdot (g - 3,19) & \text{if } g > 3,19\% \end{cases}$ | 0,77 |

Fonte: Llopis-Castelló et al. (2018)

Onde:

V_{85L} : velocidade operacional dos veículos pesados carregados (km/h)

V_{85U} : velocidade operacional dos veículos pesados não carregados (km/h)

R : raio (m)

g : grade (%)

2.4 APLICAÇÕES DA VELOCIDADE OPERACIONAL

A velocidade operacional tem diferentes aplicações, além da análise da consistência geométrica, é utilizada em estudos para a definição da velocidade limite e como input de softwares de modelagem de tráfego.

2.4.1 Análise da Consistência Geométrica

A consistência geométrica de uma rodovia é definida como a relação entre suas características geométricas e aquelas que o condutor espera encontrar. Um traçado é considerado não consistente se apresenta mudanças inesperadas que podem surpreender o condutor, levando a executar manobras que poderão ocasionar acidentes (CASTRO et al., 2008; CAMACHO TORREGROSA et al., 2013).

Há vários critérios para medir a consistência geométrica de uma rodovia (GARACH MORCILLO, 2014):

- Critérios baseados na estabilidade do veículo analisando o atrito transversal e o contato entre o pavimento e o pneu;
- Critérios baseados em índices do traçado;
- Critérios baseados na análise da carga de trabalho do condutor; e
- Critérios baseados na velocidade operacional e nos elementos geométricos sucessivos de um segmento.

Diversos autores concordam que a velocidade operacional é a forma mais eficiente para avaliar a consistência geométrica, pois é relativamente fácil de medir e representa o comportamento dos condutores (GIBREEL et al., 2001, FITZPATRICK et al., 2000, CAMACHO et al., 2013).

Os métodos de análise da consistência geométricas baseados no perfil de velocidades são utilizados para determinar inconsistências ao longo do traçado de uma rodovia. A comparação das velocidades operacionais entre os elementos consecutivos do traçado é uma medida adequada, pois uma mudança brusca na geometria gera uma mudança brusca na velocidade operacional.

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 (TRENTIN, 2007).

Os principais métodos existentes para análise da consistência estão relacionados na Tabela 16.

Tabela 16 - Principais métodos de análise de consistência geométrica

| Método | Autor/ano | Características |
|------------------------|-------------------------|--|
| Critérios de segurança | Lamm et al, 1998 | <ul style="list-style-type: none"> - Critérios de segurança (I, II e III) - Ponderação entre os critérios - $V_{85} = f(\text{grau da curva})$ - Tangentes são elementos dinâmicos |
| IHSDM | Fitzpatrick et al, 2000 | <ul style="list-style-type: none"> - $V_{85} = f(\text{alinhamentos horizontal e vertical})$ - Tangentes são elementos dinâmicos - Aceleração e desaceleração = $f(\text{alin. horiz. e vertical})$ |
| Suíça | 1970 | <ul style="list-style-type: none"> - Tangentes são elementos dinâmicos - $v_{85,i} - v_{85,i+1} \leq 20 \text{ km/h}$ |
| Alemanha | 1970 | <ul style="list-style-type: none"> - $V_{85} = f(\text{CCR})$ - Tangentes são elementos dinâmicos |
| Austrália | 1980 | <ul style="list-style-type: none"> - Análise do ambiente de velocidades - $V_{\text{ambiente de velocidades}} - V_{85} < 10 \text{ km/h}$ |
| Leisch e Leisch | 1977 | <ul style="list-style-type: none"> - $V_{85} = f(\text{grau da curva})$, em curvas e tangentes - Considera desempenho dos caminhões nas rampas |
| Krammes et al | 1995 | <ul style="list-style-type: none"> - $V_{85} = f(\text{grau da curva})$ - Tangentes são elementos dinâmicos - Velocidade de desejo |
| Messer | 1980 | <ul style="list-style-type: none"> - Tempo de reação corrigido |
| Critérios de segurança | Garcia, 2008 | <ul style="list-style-type: none"> - Critérios de segurança (I e II) - $V_{85} = f(\text{alinhamentos horizontal e vertical})$ - ICG_{km} e ICG_{trecho} |

Fonte: Adaptado Trentin (2007)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentados o cenário de estudo e as etapas metodológicas utilizadas para alcançar o objetivo deste estudo. O estudo está organizado em cinco etapas. A primeira etapa tem por finalidade selecionar e caracterizar o trecho a ser estudado, denominada SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA. A segunda etapa visa identificar os segmentos para este estudo, denominada IDENTIFICAÇÃO DOS SEGMENTOS EM CURVA. A terceira etapa tem por finalidade caracterizar os diferentes padrões de comportamento observados em rodovias de pista simples, denominada CAPTURA DE DADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE VELOCIDADE. A quarta etapa organizar os dados e visa avaliar a melhor forma de testar hipóteses e modelar os comportamentos observados, denominada TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS. Por fim, propõem-se a Estimação de Modelos de Previsão da Velocidade Operacional para Diferentes Tipos de Veículos de Carga.

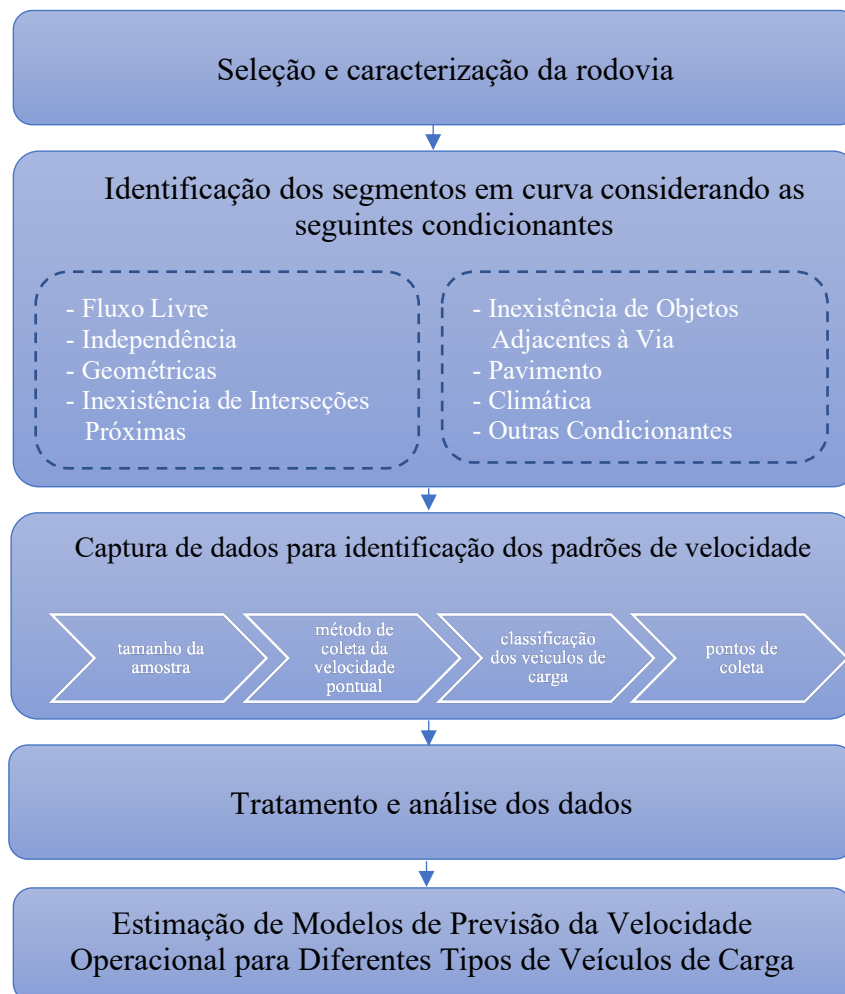


Figura 6 - Fluxograma das etapas metodológicas do estudo

3.1 CENÁRIO DO ESTUDO

Como cenário do estudo, foi selecionada uma rodovia de pista simples, localizada em zona rural do Estado do Rio Grande do Sul. Esta apresenta raios de curvatura horizontal entre 100 e 2500 metros e rampas entre -9% e +9%, características essenciais para desenvolvimento do estudo. Sua localização, bem como caracterização estão apresentados no Capítulo 4, referente ao estudo de caso.

3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS

As etapas metodológicas são: seleção e caracterização da rodovia; identificação dos segmentos em curva; Coleta dos dados de velocidades; tratamento e análise dos dados; e estimação de modelos de previsão da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga. Neste capítulo é feita a descrição das etapas metodológicas.

3.2.1 Seleção e caracterização da rodovia

A seleção do trecho de estudo foi realizada considerando como princípio básico atender aos seguintes critérios: (i) ser em uma rodovia inserida em zona rural, não inserida em zona urbana (trechos em zona urbana não serão objeto de estudo neste trabalho); (ii) possuir pista simples; (iii) receber tráfego de veículos de carga na composição da frota circulante; e (iv) estar em boas condições de manutenção, principalmente quanto às condições do pavimento e da sinalização.

A escolha do cenário de rodovia de pista simples decorre do fato de ser esta uma condição frequente na malha rodoviária do Rio Grande do Sul e ser nessas condições que as diferenças nas velocidades operacionais dos veículos de carga provocam expressivos impactos nas condições de congestionamento e segurança viária. O trecho objeto de estudo deve possuir boas condições de trafegabilidade, pois irregularidades no pavimento, como presença de buracos, provocam reduções significativas na velocidade, alterando o comportamento do motorista.

Após a seleção da rodovia, a próxima etapa foi realizar a caracterização da mesma, principalmente suas características geométricas, tanto planimétricas como altimétricas. O alinhamento horizontal e vertical foram obtidos com o uso da ferramenta SAEPRO - Sistema Avançado para Estudos e Projetos Viários.

O SAEPRO – Sistema Avançado para Estudos e Projetos Viários – tem por objetivo principal identificar, caracterizar e hierarquizar os elementos, métodos e processos necessários à concepção, construção e manutenção de uma obra de infraestrutura viária, que incorpora o conceito BIM (Building Information Model) de virtualização, modelagem e gerenciamento das atividades, provendo uma visualização mais aproximada da realidade e facilitando a observação de possíveis inconformidades, envolvendo: Ferramentas de Produtividade: Ambiente CAD, Editor de Textos, Planilha Eletrônica, Visualizador PDF, Geração de Relatórios, Mapas do Bing e Geração de Pranchas; Ferramentas de Obtenção de Dados: Imagens, Mapas e Superfícies do Bing. Desenvolvido no conceito de PLATAFORMA, o SAEPRO oferece condições de inclusão de módulos específicos. Os principais módulos do SAEPRO são: Módulo Topográfico; Projeto Geométrico; Projeto de Terraplenagem; Projeto de Drenagem, Projeto de Sinalização e Análise de Consistência Geométrica (conforme proposto pela FHWA). Decorre da parceria das empresas STE (Serviços Técnicos de Engenharia S.A.) e CIENGE (Consultoria em Informática e Engenharia Ltda.) com a UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

3.2.2 Identificação dos segmentos em curva

Como visto no tópico 2.3.1.1, os modelos de previsão de velocidade que apresentam melhor ajuste são aqueles focados em curvas, onde tanto a velocidade utilizada para calibrar o modelo como a para estimar é geralmente a do ponto central da curva. Neste estudo, serão analisadas as velocidades em segmentos em curvas.

Segundo García (2002), para se reduzir ou eliminar a interferência de outros fatores sobre a velocidade operacional, é necessário considerar algumas condicionantes para selecionar os segmentos em curva para o estudo.

As condicionantes a ser consideradas são: (a) Condicionante de Fluxo Livre; (b) Condicionante de Independência; (c) Demais Condicionantes Geométricas; (d) Condicionante da Inexistência de Interseções Próximas; (e) Condicionante da Inexistência de Objetos Adjacentes à Via; (f) Condicionante de Pavimento; (g) Condicionante Climática; (h) Outras Condicionantes.

a) *Condicionante de Fluxo Livre*

A velocidade operacional é definida como a velocidade com que motoristas são observados conduzindo seus veículos em condições de fluxo livre (DNER, 1999). Portanto, para a determinação da velocidade operacional se pressupõem o fluxo livre de veículos.

Segundo Pérez Zuriaga et al. (2011), o intervalo usualmente utilizado para diferenciar os veículos em fluxo livre é 5 segundos. Bonneson e Pratt (2009) consideraram no seu estudo um *headway* de 7 segundos para veículos leves e 3 segundos para veículos pesados. Na presente pesquisa, para diferenciar os veículos pesados em fluxo livre, foi utilizado *headway* de 4 segundos.

b) *Condicionante de Independência*

Para garantir a independências entre as curvas pesquisadas, é necessário verificar a intertangente existente.

García (2002) condicionou a independência entre curvas através da intertangente mínima. Portanto, para rodovias com velocidade diretriz de 60 km/h seria de 240 m e para rodovias com velocidade diretriz de 80km/h, 320m.

Segundo Jacques e Stumpf (2000), a velocidade da corrente de tráfego sofre significativa redução em um intervalo de 210 metros anterior e posterior a localização da barreira eletrônica. Apesar do estudo ser realizado em área urbana, em condições diferentes da proposta aqui neste estudo, a condição da presença de uma barreira eletrônica é mais adversa e pode ser utilizada como referência para o entendimento do comportamento do motorista em relação a redução de velocidade.

Donnell et al. (2001) no estudo de modelos de estimativa de velocidade operacional para caminhões, utilizou a distância de 200m antes e depois do ponto de tangência das curvas como referência para a coleta de dados, ou seja, 200 m antes do início da curva e 200m depois da curva. No presente estudo, o valor mínimo de intertangente adotado será de 200m para garantir a independência entre as curvas.

c) Demais Condicionantes Geométricas

Em pesquisas anteriores, ficou demonstrado que a variação mais expressiva da velocidade operacional se dá no intervalo de curvas com raios menores – 30 a 100 metros (LAMM et al., 1990).

Valores inferiores a 50 metros são raros, uma vez que não são considerados adequados para rodovias de Classe 0, I, II e III. Raios superiores a 1000 metros apresentam comportamento muito próximo a de tangentes, quase não influenciando na redução da velocidade operacional (GARCÍA, 2002). Os valores de raios considerados para o estudo estão dentro dos 3 níveis de tratamento estabelecidos ($R < 200\text{m}$, $200\text{m} \leq R < 600\text{m}$, $R \geq 600\text{m}$).

Os valores das rampas consideradas estão dentro do intervalo de -5% a +5%. Foram estabelecidos 3 níveis de tratamento para as rampas:

- Aclive: $i > +2\%$;
- Nível: $+2\% \leq i \leq -2\%$; e
- Declive: $i > -2\%$.

Em relação às características das seções transversais, foram consideradas seções em corte, aterro e mistas sem restrição. Não serão considerados no estudo segmentos com alteração significativa na largura da pista, com tapers, recuos e terceiras faixas.

d) Condicionante da Inexistência de Interseções Próximas

O objetivo deste estudo é a determinação de um modelo de estimativa de velocidade operacional para veículos pesados em função de características geométricas de rodovias de pista simples. Portanto, a existência de interseções próximas aos locais analisados é fator perturbador do fluxo de veículos. Isso se deve às desacelerações provocadas na área de influências das interseções e acessos. Sendo assim, neste estudo, não foram considerados segmentos de rodovias próximos às interseções.

e) Condicionante da Inexistência de Objetos Adjacentes à Via

A existência de objetos adjacentes a via pode causar atrito lateral, interferindo, portanto, na velocidade operacional. Isto ocorre, principalmente, na travessia de pequenas localidades (muros, igrejas, cemitérios, bares, postos de gasolina, etc.) (GARCÍA, 2002). Sendo assim,

neste estudo, não foram considerados segmentos de rodovias que apresentem objetos adjacentes à mesma.

f) Condicionante do Pavimento

Os segmentos de rodovias selecionados devem possuir boas condições de trafegabilidade. Os defeitos presentes no pavimento de uma rodovia reduzem a velocidade. Portanto, no presente estudo, serão analisados segmentos com pavimento em boas condições.

g) Condicionante Climática

Para o presente estudo, no levantamento de campo, será considerado apenas dias sem chuva, sem neblina ou neve.

h) Outras Condicionantes

Nos segmentos analisados a condição da sinalização existente deve estar adequada, não serão considerados segmentos com sinalização ostensiva, com presença de controladores de velocidade (físicos ou eletrônicos), ou qualquer outro dispositivo que interfira na velocidade operacional. Com base nas condicionantes, foram elencados os possíveis locais para a coleta de dados.

3.2.3 Captura de dados para identificação dos padrões de velocidade

Os dados necessários para a determinação da velocidade operacional dos veículos de carga foram coletados usando o Método de coleta de velocidade pontual, respeitando o tamanho mínimo da amostra.

- Tamanho da amostra

Para considerar como representativas as medições de velocidades pontuais obtidas em campo para cada classe de veículos de carga, a quantidade mínima a ser considerada foi definida pela equação 3.1 apresentada pelo ITE (ITE, 1994).

$$N = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2} \quad (3.1)$$

Onde:

N = número mínimo de dados amostrais a serem coletados;

S = desvio padrão estimado da amostra;

K = constante correspondente ao nível de confiança desejado;

E = erro admissível para a estimativa;

U = constante de correção ao percentil analisado (para 85% = 1,04).

Segundo ITE (1994), a estimativa do desvio padrão S pode ser obtida pela Tabela 17.

Tabela 17 - 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, tem-se os valores apresentados por Box e Oppenlander, 1796, *apud* ITE, 1994, apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Constante correspondente ao nível de confiança

| Constante K | Nível de Confiança (%) |
|-------------|------------------------|
| 1,00 | 68,3 |
| 1,50 | 86,6 |
| 1,64 | 90,0 |
| 1,96 | 95,0 |
| 2,00 | 95,5 |
| 2,50 | 98,8 |
| 2,58 | 99,0 |
| 3,00 | 99,7 |

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

O erro permitido na estimativa da velocidade corresponde a uma tolerância em valor absoluto. Segundo ITE (1994), erros permitidos típicos variam entre $\pm 1,0$ mph e ± 5 mph (1,61km/h e 8,05 km/h). No presente estudo, será adotado o valor de 6 km/h para o erro admissível.

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 o tamanho da amostra.

- Método de coleta dos dados de velocidade pontual

O objetivo da coleta da velocidade pontual é o de determinar a velocidade do veículo no instante que ele passa por um determinado ponto ou seção da via. Este tipo de velocidade é fundamental para a análise das condições de segurança na circulação, pois reflete o desejo dos motoristas, no sentido de imprimirem ao veículo as velocidades que julgam adequadas para as condições geométricas, ambientais e de tráfego existentes no local (DNIT, 2006).

Diversas são as formas de obtenção de dados de velocidade pontual. Podendo ser utilizado radar portátil, cronômetro, tubos pneumáticos, vídeos ou GPS passivo, cada instrumento com seus pontos positivos e negativos.

Para o presente estudo, serão utilizados os equipamentos disponibilizados pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER/RS através de um Termo de Cooperação Técnica realizado com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS através do Laboratório de Sistemas de Transportes – LASTRAN.

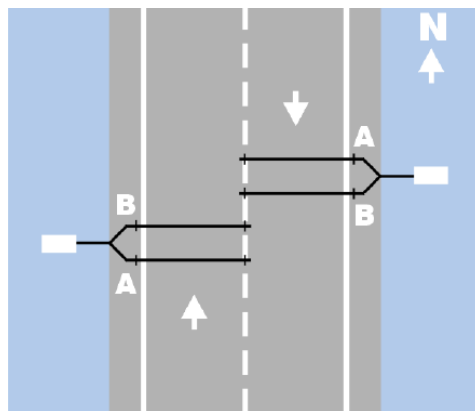
Os equipamentos disponibilizados permitem a medição de volume classificado e velocidade pontual por faixa de pista de rolamento através de sistema pneumático. Trata-se dos equipamentos da *MetroCount* (MC-5600), que operam com duas mangueiras de ar e são alimentados por um conjunto de baterias alcalinas (substituíveis) que lhes dão uma autonomia de 290 (duzentos e noventa) dias de coleta contínua de dados.

A Unidade de Processamento, montada sobre uma estrutura de PVC é totalmente a prova d'água. A comunicação de dados com a Unidade de Processamento Central é feita através de uma porta de comunicação padrão RS-232 e de um software de comunicação. Para proteção mecânica contra choques involuntários o equipamento possui uma caixa de aço inoxidável que o protege quando operando na pista.

Após o término das medições, os dados são descarregados em um computador contendo o software da *MetroCount* (MC Report), que gera diversos tipos de relatórios, dependendo da necessidade do usuário.

Os equipamentos podem ser instalados de diversas formas, com um ou dois sensores, a configuração mais comum é o uso do equipamento com dois sensores em paralelo, a uma distância de um metro separando os dois.

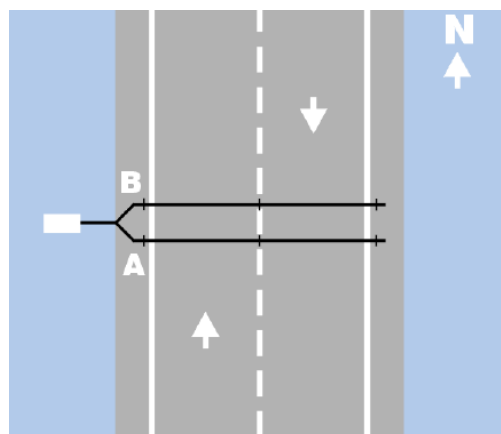
Para a coleta de dados em pistas bidirecionais o melhor método é instalar uma unidade para cada sentido, conforme indicado na Figura 7. Isso garante maior precisão na coleta do volume, classificação e determinação da velocidade dos veículos pontual.



Fonte: Manual MetroCount (2002)

Figura 7 - Instalação em pista simples - melhor configuração

Porém, não há nada que impeça que a coleta dados em uma rodovia pista simples bidirecional seja feita com um único equipamento. Isso por que a probabilidade de um veículo cruzar com outro sobre o sensor é muito pequena e, portanto a perda de dados desprezível. Assim a configuração a seguir também pode ser utilizada nesta condição (Figura 8).



Fonte: Manual MetroCount (2002)













Figura 8 - Instalação em pista simples - configuração alternativa

No presente estudo, foram utilizadas as duas configurações.

- Classificação dos veículos de carga

O MC-5600 utiliza a classificação de veículos ARX (Tabela 19), que é uma adaptação da AustRoads94.

Tabela 19 - Classificação ARX (fonte: Manual MetroCount, 2002)

| Eixos | Grupos de eixos | Descrição | Classe | | Parâmetros | Veículo Dominante |
|-----------|-----------------|---|--------|----|--|---|
| 2 | 1 ou 2 | Muito curto – bicicleta ou motocicleta | MC | 1 | $d(1) < 1.7m$ e eixos=2 |  |
| 2 | 1 ou 2 | Curto - Veículos de passeio, vans pequenas | SV | 2 | $d(1) \geq 1.7m$, $d(1) \leq 3.2m$ e eixos=2 |  |
| 3, 4 ou 5 | 3 | Curto com reboque – veículos de passeio com reboque | SVT | 3 | grupos=3, $d(1) \geq 2.1m$, $d(1) \leq 3.2m$, $d(2) \geq 2.1m$ e eixos=3,4,5 |  |
| 2 | 2 | Caminhões de dois eixos ou ônibus | TB2 | 4 | $d(1) > 3.2m$ e eixos=2 |  |
| 3 | 2 | Caminhões de 3 eixos ou ônibus | TB3 | 5 | eixos=3 e grupos=2 |  |
| >3 | 2 | Caminhões de quatro eixos | T4 | 6 | eixos>3 e grupos=2 |  |
| 3 | 3 | Veículo de três eixos articulados-caminhão trator+semi-reboque | ART3 | 7 | $d(1) > 3.2m$, eixos=3 e grupos=3 |  |
| 4 | >2 | Veículo de quatro eixos articulados - caminhão trator+ semi-reboque ou reboque ou +2 semi-reboque | ART4 | 8 | $d(2) < 2.1m$ ou $d(1) < 2.1m$ ou $d(1) > 3.2m$ eixos = 4 e grupos>2 |  |
| 5 | >2 | Veículo de cinco eixos articulados-caminhão trator+ semi-reboque ou caminhão+reboque ou caminhão trator+reboque+semi-reboque ou caminhão trator+ 2 semi-reboque | ART5 | 9 | $d(2) < 2.1m$ ou $d(1) < 2.1m$ ou $d(1) > 3.2m$ eixos=5 e grupos>2 |  |
| ≥6 | >2 | Veículo de seis ou mais eixos articulados- caminhão+reboque ou caminhão trator+ semi-reboque+reboque ou caminhão trator+2 semi-reboque ou caminhão trator+semi-reboque+ reboque | ART6 | 10 | eixos=6 e grupos>2 ou eixos>6 e grupos=3 |  |
| >6 | 4 | Bi-trem- caminhão+reboque ou caminhão trator+ 2 semi-reboque | BD | 11 | grupos=4 e eixos>6 |  |
| >6 | ≥5 | Bi-trem ou tri-trem- caminhão trator+ 2 semi-reboques ou + 3 semi-reboques ou caminhão+2reboques | DRT | 12 | grupos=5 ou 6 e eixos>6 |  |

Legenda: d – distância

A Tabela 20 apresenta a equivalência da classificação ARX com a classificação por categorias utilizada pelo DNIT.

Tabela 20 - Equivalência entre as classes ARX e as categorias do DNIT

| Classe ARX | | Categoria de veículos DNIT |
|------------|----|----------------------------|
| MC | 1 | 9 (moto) |
| SV | 2 | 1 (carro) |
| SVT | 3 | 3 (carro + reboque) |
| TB2 | 4 | 2 (2 eixos – rígido) |
| TB3 | 5 | 4 (3 eixos – rígido) |
| T4 | 6 | 5 (4 eixos) |
| ART3 | 7 | 5 (3 eixos – articulado) |
| ART4 | 8 | 6 (4 eixos – articulado) |
| ART5 | 9 | 7 (5 eixos – articulado) |
| ART6 | 10 | 8 (6 eixos – articulado) |

Fonte: DNIT (2006)

- Pontos de Coleta

As velocidades devem ser coletadas no meio das curvas horizontais definidas em função das condicionantes elencadas anteriormente. A fim de minimizar os erros na classificação dos veículos, em algumas curvas serão instalados três sensores na entrada e três na saída das mesmas com distância de 100 m entre eles. O objetivo é obter a classificação correta dos veículos pesados que efetivamente entrarem e saírem das curvas.

3.2.4 Tratamento e análise dos dados

Foi verificada a conformidade da informação referente à classificação dos veículos. No presente estudo, foram utilizados apenas os dados de velocidade dos veículos pesados, portanto os veículos de passeio foram desconsiderados.

Para diferenciar os veículos de carga em fluxo livre, foi realizada a filtragem dos dados utilizando *headway* de 4 segundos por categoria. Para cada categoria de veículos foram calculados o desvio padrão e a média das velocidades pontuais medidas, com o objetivo de verificar o tamanho mínimo da amostra (equação 3.1) também por categoria. O valor obtido para o tamanho mínimo da amostra foi comparado com número de medições realizadas para cada categoria de veículos em cada curva analisada. Não atingindo o tamanho mínimo da amostra, a categoria foi eliminada.

Com o intuito de evitar tendências e influências indesejadas para o cálculo do modelo matemático, a amostra foi aleatorizada. Para isto, utilizou-se a função “ALEATÓRIO” do Microsoft Excel.

Feito isso, a amostra foi dividida em duas partes, onde a primeira contém 70% da amostra e a segunda parte 30% do total. A primeira parte foi usada para a estimação do modelo matemático, e a segunda parte foi usada para se fazer o teste e validação do modelo matemático estimado.

Em seguida, foram calculadas as velocidades operacionais (V_{85}) por curva, por sentido e por categoria de veículos.

- Análise de Regressão Linear Múltipla

Para a análise dos dados de velocidade operacional, foi utilizada a técnica de análise de regressão linear múltipla. Esta técnica estuda a relação entre a variável dependente ou variável de resposta (Y) e duas ou várias variáveis independentes (X_1, X_p). Esta relação representa-se por meio de um modelo matemático, ou seja, por uma equação que associa a variável dependente com as variáveis independentes.

O Modelo de Regressão Linear Múltipla define-se como a relação linear entre a variável dependente (Y) e as variáveis independentes (X_1, X_p).

A equação representativa do modelo de regressão linear múltipla é dado por:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3.2)$$

Onde:

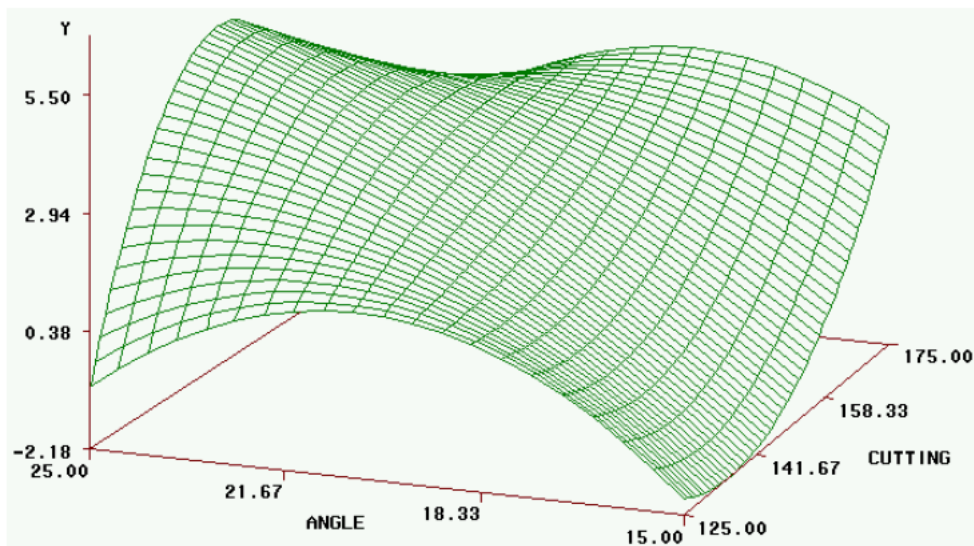
y_i : valor da variável dependente, Y , na observação i , $i=1, \dots, n$;

$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$, $i=1, \dots, n$: valores da i -ésima observação das p variáveis independentes;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$: parâmetros ou coeficientes de regressão;

ε_i , $i=1, \dots, n$: erros aleatórios.

Este modelo descreve um hiperplano p -dimensional referente às variáveis independentes conforme ilustrado na Figura 9.



Fonte: Rodrigues, 2012

Figura 9 - Hiperplano p-dimensional referente às variáveis independentes

Segundo Holcomb et al. (1999), os pressupostos para o modelo de regressão linear múltipla são:

- a) $E[\varepsilon_i] = 0, i = 1, \dots, n$;
- b) Os erros são independentes;
- c) $V[\varepsilon_i] = \sigma^2, i = 1, \dots, n$ (variâncias constantes);
- d) Os erros têm distribuição normal.

Para estimar os parâmetros do modelo de regressão linear múltipla, é possível recorrer ao método dos mínimos quadrados, que permite encontrar uma reta que minimize a distância entre os pontos observados e a reta, fazendo, em média, a soma dos desvios quadráticos ser igual a zero.

O teste de significância para a regressão múltipla é um teste para se determinar se há uma relação linear entre a função resposta y e as variáveis independentes x , para este efeito utiliza-se um teste de hipótese. As hipóteses a testar são:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \text{ (hipótese nula)} \quad (3.3)$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para algum } j, j = 1, \dots, k \text{ (hipótese alternativa)} \quad (3.4)$$

Temos portanto, um teste bilateral face a n observações (a amostra). A hipótese nula que se pretende testar é a não existência de regressão. A rejeição de H_0 significa que pelo menos umas das variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_k contribui significativamente para explicar a

variação da variável dependente Y , e esta explicação pode ser representada por um modelo de regressão linear (o modelo diz-se significativo). Caso se rejeite H_0 , conclui-se que as variáveis independentes não contribuem para explicar a variação de Y . Portanto, conclui-se que não há relação linear entre as variáveis, diz-se que o modelo não é significativo.

Quando se pretende realizar um teste bilateral, a análise de variância pode ser utilizada para se analisar a significância do modelo de regressão. Nesta análise de variância, o teste F produz um teste mais geral. Através da sua utilização determina-se se qualquer das variáveis independentes no modelo possui poder de explicação. Cada variável pode então ser testada individualmente com o teste t para determinar se é uma das variáveis significativas.

O coeficiente de determinação indica quantos por cento a variação explicada pela regressão representa sobre a variação total. Deve-se ter valores entre 0 e 1. Assim, quanto mais próximo de 1 estiver o valor do coeficiente de determinação, maior a percentagem da variação de Y explicada pela regressão linear múltipla, e por conseguinte, maior a qualidade do ajustamento.

3.2.5 Estimação de Modelos de Previsão da Velocidade Operacional para Diferentes Tipos de Veículos de Carga

A partir dos resultados do estudo na etapa anterior, foram estimados modelos de previsão da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga e foi realizada a avaliação quanto à qualidade do modelo e sua validação. Para tanto, como salientado anteriormente, a base original foi desmembrada em duas. A primeira, contendo 70% da amostra, foi utilizada para a elaboração do modelo. A segunda foi empregada no processo de validação do modelo.

Para a avaliação dos resultados do modelo de estimativa da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga, foi verificado se as variáveis são estatisticamente significativas para o nível de significância adotado e o valor do coeficiente de determinação do modelo (R^2).

Para validação do modelo estimado, foi utilizada a segunda parte da amostra, contendo 30% do total. Para estes pontos, foi calculado o valor predito através do modelo e este valor foi comparado ao valor medido, e assim, foi possível verificar se o modelo é ou não válido para a utilização pretendida.

4 ESTUDO DE CASO: RODOVIA ERS-122

Neste capítulo, é apresentada a aplicação dos procedimentos metodológicos descritos no Capítulo 3. Neste estudo de caso é obtida a velocidade operacional em curvas horizontais em rodovia de pista simples, possibilitando a estimação de modelos de previsão de velocidade operacional em função das principais características geométricas da rodovia.

4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA

A rodovia selecionada para o estudo de caso foi a rodovia estadual ERS-122, localizada no Estado do Rio Grande do Sul, também conhecida como rodovia Sinval Guazzelli. Esta rodovia tem início na rodovia estadual ERS-240 (próximo a São Sebastião do Caí) e termina no entroncamento com a rodovia federal BR-116/RS, passando pelos municípios de Bom Princípio, São Vendelino, Farroupilha, Caxias do Sul, Flores da Cunha, Antônio Prado, Ipê e Campestre da Serra. É considerada uma das principais vias de escoamento da produção da serra gaúcha, servindo como alternativa à rodovia BR-116/RS.

O trecho selecionado para o estudo se encontra entre os municípios de Ipê e Campestre da Serra, sendo que o final do trecho se localiza junto ao limite do município de Vacaria. O trecho estudado está situado entre km 129+710 e km 168+650 da rodovia com código 122ERS0190, conforme cadastro do Sistema Rodoviário Estadual – SRE. O trecho fica distante 183 km do município de Porto Alegre.

Trata-se de segmento em pista simples, inserido em zona rural, classificado conforme como Classe III, situado em região ondulada com velocidade diretriz de 60 km/h. Conforme dados obtidos na presente pesquisa, o volume médio diário atual é de 3.188 veículos, sendo a frota circulante é composta por 49% de veículos de passeio, 36% de veículos de carga e 15% de coletivos.

O trecho objeto do estudo apresenta boas condições de manutenção, principalmente quanto às condições do pavimento e da sinalização. Possui, ainda, pista de rolamento de 7,00 metros e acostamentos de largura variável entre 1,00 e 2,00 metros. A Figura 10 ilustra o mapa de localização da rodovia estadual ERS-122, bem como o trecho selecionado para estudo.

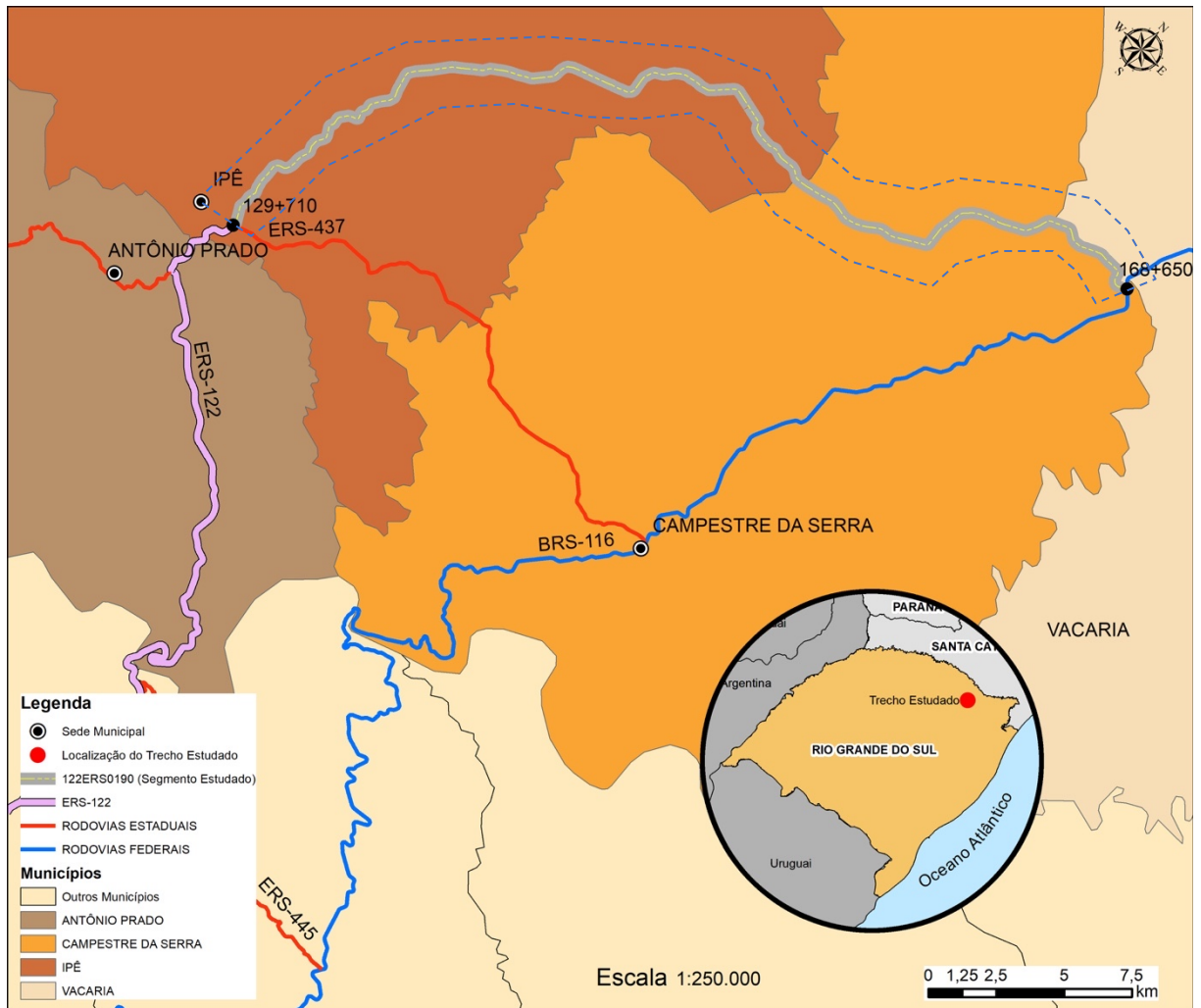


Figura 10 - Localização do trecho de estudo (Fonte: elaborada pela autora)

A geometrização do trecho de estudo, ou seja, a obtenção do alinhamento horizontal e vertical, foi realizada com o uso da ferramenta SAEPRO - Sistema Avançado para Estudos e Projetos Viários. A Figura 11 ilustra a tela do *software* com a geometria obtida. Tal procedimento foi necessário com a finalidade de selecionar os segmentos em curvas que atendessem as condicionantes elencadas, bem como ao plano amostral considerando os raios de curvatura horizontal e rampas.

O trecho selecionado possui 38,84 km de extensão. Apresenta 93 curvas horizontais com raios variando entre 100m e 2.500m; 140 curvas verticais com projeções entre 50m e 500m; rampas em alicve entre 0,002% e 9,15%; rampas em declive entre -8,8903% e -0,074%.

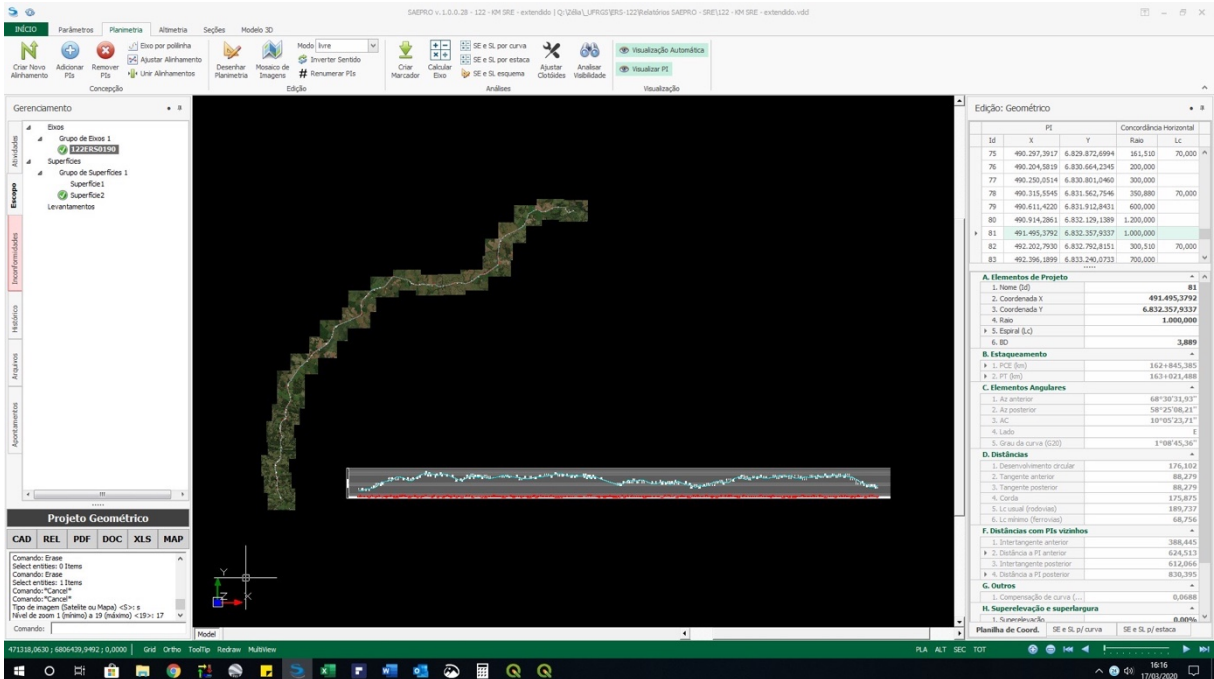


Figura 11 - Tela do software SAEPRO com a geometria do trecho

4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS SEGMENTOS EM CURVA

A identificação dos segmentos em curvas foi baseada na verificação das condicionantes propostas no tópico 3.2.2. Como ferramenta principal para análise dos segmentos, foi utilizado o software SAEPRO e posterior vistoria ao trecho.

4.2.1 Verificação da independência das curvas

A independência entre as curvas é verificada através da extensão da intertangente. No presente estudo, o valor mínimo adotado foi de 200m. O relatório da planilha de coordenadas gerado pelo SAEPRO apresenta os valores das intertangentes no trecho de estudo. A Figura 12 apresenta um recorte da planilha dos dados obtidos.

| PLANILHA DE COORDENADAS | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|------------|----------|-------------|-------------|
| Rodovia: Grupo de Eixos 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Trecho: 122ERS0190 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Segmento: km: 129+710,00 ao km: 168+548,00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PI | ESTAQUEAMENTO (Est. ou km) | | | | PARÂMETROS DA CURVA | | | | | | | ALINHAMENTO | | | COORDENADAS | |
| | PC ou TE | EC | CE | PT ou ET | AC (°) | R (m) | Lc1 (m) | Lc2 (m) | Dc (m) | T1 (m) | T2 (m) | Az (°) | IntTan (m) | ΔPI (m) | X (m) | Y (m) |
| 45 | 144+842,503 | 144+912,503 | 144+927,212 | 144+997,212 | 17°26'02,65" D | 278,39 | 70 | 70 | 14,709 | 77,778 | 77,778 | 66°57'42,38" | 1788,611 | 2115,055 | 478102,1779 | 6825261,501 |
| 46 | 146+785,824 | 146+835,824 | 147+166,178 | 147+216,178 | 75°24'25,85" E | 289 | 50 | 50 | 330,354 | 248,666 | 248,666 | 35°13'31,653" | 404,275 | 738,819 | 480048,5449 | 6826089,217 |
| 47 | 147+620,452 | 147+690,452 | 147+720,354 | 147+790,354 | 24°21'14,76" D | 235,03 | 70 | 70 | 29,902 | 85,878 | 85,878 | 15°54'31,29" | 234,765 | 427,213 | 479940,0368 | 6826820,025 |
| 48 | 148+025,119 | 148+095,119 | 148+161,990 | 148+231,990 | 39°14'10,84" D | 199,87 | 70 | 70 | 66,872 | 106,57 | 106,57 | 55°08'42,13" | 178,486 | 392,704 | 480057,1379 | 6827230,875 |
| 49 | 148+410,477 | 148+480,477 | 148+552,989 | 148+622,989 | 26°04'05,75" E | 313,23 | 70 | 70 | 72,512 | 107,648 | 107,648 | 29°04'36,38" | 110,946 | 276,739 | 480379,3911 | 6827455,306 |
| 50 | 148+733,935 | 148+783,935 | 148+799,877 | 148+849,877 | 12°54'00,21" D | 292,88 | 50 | 50 | 15,941 | 58,145 | 58,145 | 41°58'36,59" | 46,778 | 203,262 | 480513,881 | 6827697,167 |

Figura 12 - Verificação das intertangentes acima de 200m

4.2.2 Identificação dos segmentos em rampa

Para o presente estudo, os valores das inclinações das rampas consideradas estão dentro do intervalo de -5% a +5%. Foram estabelecidos 3 níveis de tratamento para as rampas:

- **Active:** $i > +2\%$;
- **Nível:** $+2\% \leq i \leq -2\%$; e
- **Declive:** $i > -2\%$.

A identificação da inclinação das rampas foi realizada com base no relatório de altimetria gerado pelo SAEPRO conforme ilustra a Figura 13.

| COORDENADAS E PARÂMETROS POR ESTACAS | | | | | | | | | | | |
|--|--------|-----------------------------|-------------|----------|------------------------|----------------|------------------------|---------|-------|------------|-----------------------------|
| Rodovia: Grupo de Eixos 1 | | | | | | | | | | | |
| Trecho: 122ERS0190 | | | | | | | | | | | |
| Segmento: km: 129+710,00 ao km: 168+548,00 | | | | | | | | | | | |
| ESTACA | | COORDENADAS CARTESIANAS (m) | | | COORD. GEOGRÁFICAS (°) | | PARÂMETROS GEOMÉTRICOS | | | OBSERVAÇÃO | |
| km | TIPO | X | Y | Z | LATITUDE | LONGITUDE | AZ (°) | R (m) | I (%) | | SE (%) |
| 147+620,452 | TED-47 | 479952,6494 | 6826735,078 | 849,3314 | 28°41'11,22" S | 51°12'18,75" O | 351°33'16,53" | | -4,71 | | Lc=70,000 |
| 147+640,000 | | 479949,8534 | 6826754,424 | 848,4111 | 28°41'10,59" S | 51°12'18,85" O | 352°13'11,82" | 841,646 | -4,71 | | |
| 147+660,000 | | 479947,4622 | 6826774,28 | 847,4694 | 28°41'09,94" S | 51°12'18,94" O | 354°16'40,74" | 416,008 | -4,71 | | |
| 147+680,000 | | 479946,0281 | 6826794,225 | 846,5277 | 28°41'09,29" S | 51°12'18,99" O | 357°43'44,58" | 276,285 | -4,71 | | |
| 147+690,452 | EC-47 | 479945,8231 | 6826804,675 | 846,0356 | 28°41'08,96" S | 51°12'19,00" O | 360°05'12,90" | 235,03 | -4,71 | | R=235,030 / AC=24°21'14,76" |
| 147+700,000 | | 479946,0315 | 6826814,22 | 845,586 | 28°41'08,65" S | 51°12'18,99" O | 362°24'51,91" | 235,03 | -4,71 | | |
| 147+720,000 | | 479947,7227 | 6826834,142 | 844,6443 | 28°41'08,00" S | 51°12'18,93" O | 367°17'24,13" | 235,03 | -4,71 | | |
| 147+720,354 | CE-47 | 479947,7679 | 6826834,493 | 844,6277 | 28°41'07,99" S | 51°12'18,92" O | 7°22'34,92" | 235,03 | -4,71 | | R=235,030 / AC=24°21'14,76" |
| 147+740,000 | | 479951,0256 | 6826853,863 | 843,7027 | 28°41'07,36" S | 51°12'18,80" O | 11°29'36,89" | 326,728 | -4,71 | | |
| 147+760,000 | | 479955,5293 | 6826873,347 | 842,761 | 28°41'06,72" S | 51°12'18,64" O | 14°18'15,52" | 542,005 | -4,71 | | |
| 147+780,000 | ET-47 | 479960,7491 | 6826892,653 | 841,8193 | 28°41'06,10" S | 51°12'18,44" O | 15°43'19,24" | 1588,94 | -4,71 | | Lc=70,000 |
| 147+790,354 | | 479963,5764 | 6826902,614 | 841,3318 | 28°41'05,77" S | 51°12'18,34" O | 15°54'31,29" | | -4,71 | | |

Figura 13 - Identificação das rampas

4.2.3 Verificação da Inexistência de Interferências

Para o estudo foram selecionados segmentos sem a influência de interseções e acessos, bem como sem a presença de objetos adjacentes à via. Inicialmente a seleção foi realizada através da visualização das imagens de satélite ao longo do trecho com o uso do SAEPRO, conforme ilustra a Figura 14. Após foi realizada vistoria de campo, para analisar o trecho sob o ponto de vista do condutor, descartando os locais com possíveis objetos adjacentes à via que pudessem ser identificados como uma interferência ao tráfego de veículos (Figura 15).

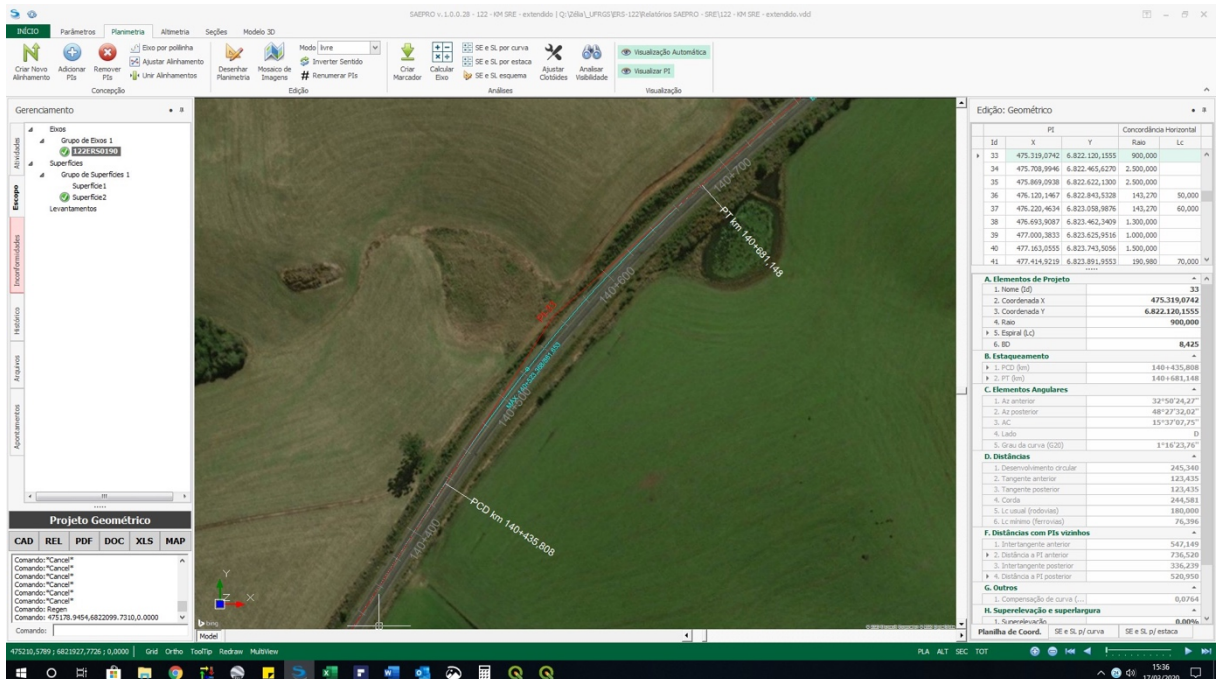


Figura 14 - Análise de interferências através do SAEPRO



Figura 15 - Vista geral da curva do PI-33

4.2.4 Seleção dos segmentos em curva

Foram identificados 15 curvas possíveis para a instalação dos tubos pneumáticos. A Tabela 21 apresenta a relação das curvas potenciais contendo o número da curva, o sentido (a

favor do estaqueamento ou contra), bem como as coordenadas geográficas do centro de cada curva.

Tabela 21 - Possíveis curvas para pesquisa de velocidades

| PI | Sentido | Latitude | Longitude |
|----|---------------|----------------|----------------|
| 33 | Ambos | 28°44'00.38" S | 51°15'24.22" W |
| 34 | Estaqueamento | 28°43'29.56" S | 51°14'55.34" W |
| 37 | Contra | 28°43'10.55" S | 51°14'36.45" W |
| 47 | Ambos | 28°41'08.96" S | 51°12'19.00" W |
| 48 | Estaqueamento | 28°40'54.97" S | 51°12'14.12" W |
| 63 | Contra | 28°40'19.76" S | 51°09'13.82" W |
| 64 | Estaqueamento | 28°40'17.93" S | 51°08'59.71" W |
| 66 | Contra | 28°40'23.33" S | 51°08'35.23" W |
| 67 | Ambos | 28°40'17.81" S | 51°08'10.22" W |
| 68 | Estaqueamento | 28°40'13.36" S | 51°07'55.42" W |
| 75 | Ambos | 28°39'30.68" S | 51°05'59.43" W |
| 76 | Estaqueamento | 28°39'03.88" S | 51°06'00.65" W |
| 77 | Contra | 28°39'00.14" S | 51°05'59.41" W |
| 81 | Ambos | 28°38'08.69" S | 51°05'12.97" W |
| 85 | Estaqueamento | 28°37'15.80" S | 51°04'11.40" W |

Para o presente estudo, além dos 3 níveis de inclinação de rampa, foram também estabelecidos 3 níveis de tratamento para os raios, ou seja, $R < 200m$, $200m \leq R < 600m$, $R \geq 600m$. A partir disto, foram elencadas as curvas indicadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Curvas selecionadas para o estudo

| | R<200 | 200=<R<600 | R>=600 |
|---|---|---------------------------------------|---|
| Active ($i > +2\%$) | PI-75C (1,30% a 3,34%, R162 e d62°) | PI-47C (+4,7%, R235 e d24°) | PI-81E (4,1%, R1000 e d10°) |
| Nível ($+2\% \leq i \leq -2\%$) | PI-37EC (-0,97% a -1,44%, R143,27 e d25°) | PI-76EC (1%, R200 e d25°) | PI-33EC (1,76% a -2,06%, R900 e d16°) |
| Declive ($i < -2\%$) | PI-75E (-3,34% a -1,30%, R162 e d62°) | PI-47E (-4,7%, R235 e d24°) | PI-81C (-4,3%, R1000 e d10°) |

Legenda: C- sentido contra o estaqueamento; E- sentido a favor do estaqueamento; R – raio; d – deflexão

4.3 COLETA DOS DADOS DE VELOCIDADES

4.3.1 Tamanho da amostra

O tamanho da amostra de medições de velocidades pontuais por tipo de veículo de carga foi determinado pela metodologia do ITE (1994) apresentada no tópico 3.2.3. Foram adotados os valores recomendados para rodovias de pista simples e análise para obtenção da velocidade 85º percentil. Portanto, para um desvio padrão de 8,5 km/h, nível de confiança de 95% ($K=1,96$)

e uma constante de correlação para 85º percentil ($U=1,04$) e erro igual a 6km/h, obteve-se um tamanho mínimo da amostra de 12 medições de velocidades pontuais por tipo de veículo de carga.

A partir desta definição inicial, foi estabelecido que em cada curva, por sentido, o tamanho mínimo da amostra seria de 12 medições de velocidade por tipo de veículo. Porém, 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. E assim, verificar o tamanho da amostra. Após a coleta de dados, foi calculado o desvio padrão para cada categoria de veículo de carga e recalculado, assim, o tamanho da amostra para cada curva e por sentido.

4.3.2 Coleta dos dados de velocidade pontual

Foram coletados dados de velocidades pontuais em 6 curvas, em ambos sentidos, totalizando 12 pontos de coleta nos centros das curvas.

A coleta foi realizada com os equipamentos disponibilizados pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER/RS. Tais equipamentos permitem a medição de volume classificado e velocidade pontual por faixa de pista de rolamento através de sistema pneumático. Trata-se dos equipamentos da *MetroCount* (MC-5600), que operam com duas mangueiras de ar e são alimentados por um conjunto de baterias alcalinas (substituíveis). A Figura 16 ilustra os equipamentos utilizados no estudo.

A Figura 17 ilustra a instalação bidirecional com um único equipamento, que é fixado transversalmente à rodovia. Os tubos são fixados paralelamente a uma distância de um metro entre si, atravessando toda a pista de rolamento. A unidade armazenadora foi pré-programada para a distância entre os tubos e pela diferença de tempos entre os dois estímulos o equipamento obtém a velocidade.

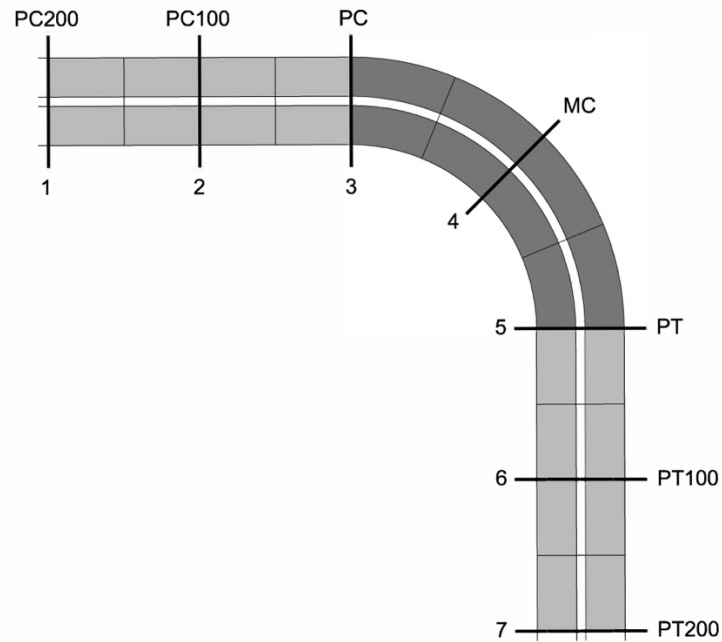


Figura 16 - Equipamentos disponibilizados pelo DAER



Figura 17 - Instalação dos tubos pneumáticos

Com o objetivo de minimizar os erros na classificação dos veículos, em três curvas foram instalados três sensores na entrada e três na saída das mesmas com distância de 100 m entre eles (Figura 18). O objetivo foi obter a classificação correta dos veículos pesados que efetivamente entraram e saíram das curvas.



Legenda: MC – meio da curva; PC – início da curva; PT – fim da curva; PCxxx – a xxxm do PC; PTxxx – a xxxm do PT.

Figura 18 - Locais de instalação dos tubos pneumáticos

A coleta foi realizada em dias de semana, durante dois dias consecutivos em cada curva, sendo o período de 12 horas para cada dia, conforme Tabela 23. Não foram realizados levantamentos em períodos de chuva, neblina ou névoa.

Tabela 23 - Período de coleta e número de sensores por curva

| Curva | Número de sensores | Período | Horário |
|-------|--------------------|-------------------------|---------------|
| 33 | 2 | 22/07/2019 – 23/07/2019 | 7:00 às 19:00 |
| 37 | 2 | 22/07/2019 – 23/07/2019 | 7:00 às 19:00 |
| 47 | 8 | 24/06/2019 – 25/06/2019 | 7:00 às 19:00 |
| 75 | 8 | 17/06/2019 – 18/06/2019 | 7:00 às 19:00 |
| 76 | 2 | 26/06/2019 – 27/06/2019 | 7:00 às 19:00 |
| 81 | 8 | 20/06/2019 – 21/06/2019 | 7:00 às 19:00 |

4.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

4.4.1 Tratamento dos dados

A primeira etapa no processo de tratamento dos dados obtidos em campo foi realizar a verificação da conformidade da informação apresentada pelo software dos equipamentos referente à classificação dos veículos. Isto foi possível, pois em três curvas foram instalados

sensores antes e depois do meio da curva. Dessa forma, com os dados coletados nestas 3 curvas foi realizada a comparação da classificação do veículo que passava em cada sensor, havendo discrepância na classificação, a informação era desconsiderada.

Após verificação da classificação, foram eliminados os veículos de passeio, as motocicletas e os veículos com *headway* inferior a 4 segundos. Pois no presente estudo, foram utilizados apenas os dados de velocidade dos veículos pesados.

A classificação dos veículos de carga foi realizada através do software dos equipamentos, segundo a classificação ARX, onde os tipos presentes na coleta de dados foram TB2, TB3, T4, ART3, ART4, ART5 e ART6. Para cada categoria de veículos de carga, foram calculados o desvio padrão e a média, com o objetivo de verificar o tamanho mínimo da amostra (equação 3.1) para cada categoria. Este valor foi comparado com número de medições obtidas para cada categoria de veículos em cada curva analisada. Não atingindo o tamanho mínimo da amostra, a categoria foi eliminada. A Tabela 24 apresenta a verificação do tamanho da amostra para a curva 37 – bordo interno, onde foi identificado que a categoria T4 não apresentou o tamanho mínimo da amostra.

Tabela 24 - Tamanho da amostra por categoria de veículos de carga para curva 37 - bordo interno

| Parâmetros | TB2 | TB3 | T4 | ART3 | ART4 | ART5 | ART6 |
|-------------------------|------------|------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| N coletado | 314 | 143 | 14 | 9 | 71 | 56 | 99 |
| Velocidade Média (km/h) | 82,28 | 77,35 | 75,76 | 83,72 | 79,54 | 76,05 | 76,32 |
| Desvio padrão | 14,18 | 9,77 | 10,92 | 6,11 | 9,89 | 7,68 | 7,36 |
| K (tabelado) | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 | 1,96 |
| Erro (km/h) | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,00 |
| U (tabelado) | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 |
| N amostra | 33,07 | 15,69 | 19,60 | 6,14 | 16,08 | 9,71 | 8,90 |
| Comparação | | | | | | | |
| Namostra x Ncoletado | ok | ok | Não | ok | ok | ok | ok |

As categorias que foram descartadas do estudo em função do tamanho mínimo da amostra foram as do tipo T4 e ART3. A categoria ART5, embora em duas situações não tenha apresentado o tamanho mínimo, verificou-se que a diferença era por questões de arredondamento, sendo assim, não foi descartada. Portanto, para o presente estudo foram utilizadas as categorias de veículos de carga TB2, TB3, ART4, ART5 e ART6. A Tabela 25 apresenta o resumo da verificação do tamanho da amostra.

Tabela 25 - Resumo da verificação do tamanho da amostra por categoria

| Curva | Bordo | TB2 | TB3 | T4 | ART3 | ART4 | ART5 | ART6 |
|-------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 33 | EXT | ok | ok | ok | Não | ok | ok | ok |
| | INT | ok | ok | ok | ok | ok | ok | ok |
| 37 | EXT | ok | ok | Não | Não | ok | ok | ok |
| | INT | ok | ok | Não | ok | ok | ok | ok |
| 47 | EXT | ok | ok | Não | Não | ok | Não | ok |
| | INT | ok | ok | ok | ok | ok | ok | ok |
| 75 | EXT | ok | ok | ok | Não | ok | Não | ok |
| | INT | ok | ok | Não | Não | ok | ok | ok |
| 76 | EXT | ok | ok | ok | ok | ok | ok | ok |
| | INT | ok | ok | ok | Não | ok | ok | ok |
| 81 | EXT | ok | ok | Não | Não | ok | ok | ok |
| | INT | ok | ok | ok | Não | ok | ok | ok |

A amostra total obtida em campo foi dividida em duas partes. A primeira parte composta por 70% do total de dados coletados (Parte 1) e a segunda parte (Parte 2) composta pelos 30% restantes. Para cada parte, foram calculadas as velocidades operacionais (V_{85}) observadas por curva, por sentido e por categoria de veículos. Os resultados obtidos para a Parte 1 estão apresentados na Tabela 26, e para a Parte 2 na Tabela 27. Para validação do modelo estimado, foi utilizada a segunda parte da amostra.

Tabela 26 - Velocidades operacionais observadas para Parte 1 da amostra

| CURVA | BORDO | V_{85} (km/h) | | | | |
|-------|-------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| | | TB2 | TB3 | ART4 | ART5 | ART6 |
| C33 | EXT | 95,031 | 87,469 | 84,615 | 80,540 | 79,682 |
| C33 | INT | 104,451 | 91,857 | 92,897 | 87,855 | 83,666 |
| C37 | EXT | 92,402 | 85,265 | 87,458 | 81,506 | 80,506 |
| C37 | INT | 96,507 | 86,943 | 84,943 | 82,540 | 83,004 |
| C47 | EXT | 80,961 | 75,603 | 78,923 | 69,562 | 59,548 |
| C47 | INT | 85,313 | 83,768 | 84,340 | 84,273 | 78,416 |
| C75 | EXT | 74,640 | 71,040 | 75,280 | 81,663 | 69,687 |
| C75 | INT | 72,788 | 70,510 | 66,397 | 61,089 | 65,129 |
| C76 | EXT | 82,353 | 78,887 | 78,620 | 77,810 | 74,688 |
| C76 | INT | 83,318 | 80,365 | 78,546 | 77,010 | 74,295 |
| C81 | EXT | 89,720 | 87,962 | 81,681 | 79,674 | 82,229 |
| C81 | INT | 84,688 | 88,513 | 83,541 | 80,928 | 80,554 |

Tabela 27 - Velocidades operacionais observadas para Parte 2 da amostra

| CURVA | BORDO | V ₈₅ (km/h) | | | | |
|-------|-------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | TB2 | TB3 | ART4 | ART5 | ART6 |
| C33 | EXT | 97,165 | 85,446 | 87,496 | 82,303 | 80,607 |
| C33 | INT | 105,538 | 88,410 | 87,746 | 84,464 | 83,602 |
| C37 | EXT | 97,875 | 86,766 | 86,497 | 77,005 | 79,486 |
| C37 | INT | 92,622 | 82,677 | 89,540 | 81,192 | 85,249 |
| C47 | EXT | 80,932 | 74,430 | 78,840 | 68,075 | 57,310 |
| C47 | INT | 83,959 | 84,652 | 82,508 | 81,937 | 81,442 |
| C75 | EXT | 74,814 | 69,482 | 76,852 | 76,370 | 68,930 |
| C75 | INT | 71,380 | 68,176 | 70,893 | 60,204 | 66,176 |
| C76 | EXT | 87,580 | 78,113 | 80,696 | 76,570 | 75,680 |
| C76 | INT | 84,891 | 78,120 | 78,788 | 77,120 | 74,205 |
| C81 | EXT | 88,721 | 82,968 | 81,638 | 82,025 | 85,615 |
| C81 | INT | 91,100 | 86,651 | 84,578 | 82,503 | 81,743 |

4.4.2 Análise dos dados

Para a análise dos dados de velocidade operacional, foi utilizada a técnica de análise de regressão linear. Foi considerada como variável dependente a velocidade operacional (V_{85}), e as variáveis independentes consideradas foram informações geométricas dos segmentos em curvas analisados quanto ao seu raio de curvatura horizontal, inclinação longitudinal e bordo da curva.

A classificação das variáveis quanto ao tipo, unidade e intervalo de variação são:

- Raio de curvatura horizontal: variável contínua, obtida pela geometrização em metros, variando entre 140 e 1.000 m;
- Inverso do raio de curvatura: variável contínua, obtida pela inversão do raio de curvatura, variando entre 0,001/m e 0,006979/m;
- Inclinação longitudinal: variável contínua, obtida pela geometrização em valores percentuais, com intervalo definido entre -5% e +5% e valores obtidos variando entre -4,70% e +4,70%;
- Bordo da curva: variável do tipo *dummy*, obtida pela geometrização, variando entre interno e externo.

A base de dados para análise de regressão linear foi obtida com os dados de velocidade operacional observados na Parte 1 da amostra e os dados das variáveis independentes, conforme Tabela 28.

Tabela 28 - Base de dados para estimativa do modelo de previsão de velocidades

| CURVA | BORDO | V85 (km/h) | | | | | RAIO (m) | 1/RAIO (1/m) | i (%) |
|-------|-------|------------|--------|--------|--------|--------|----------|--------------|-------|
| | | TB2 | TB3 | ART4 | ART5 | ART6 | | | |
| C33 | EXT | 95,031 | 87,469 | 84,615 | 80,540 | 79,682 | 900 | 0,001111111 | 0,69 |
| C33 | INT | 104,451 | 91,857 | 92,897 | 87,855 | 83,666 | 900 | 0,001111111 | -0,69 |
| C37 | EXT | 92,402 | 85,265 | 87,458 | 81,506 | 80,506 | 143,27 | 0,00697983 | 1,23 |
| C37 | INT | 96,507 | 86,943 | 84,943 | 82,540 | 83,004 | 143,27 | 0,00697983 | -1,23 |
| C47 | EXT | 80,961 | 75,603 | 78,923 | 69,562 | 59,548 | 235 | 0,00425532 | 4,70 |
| C47 | INT | 85,313 | 83,768 | 84,340 | 84,273 | 78,416 | 235 | 0,00425532 | -4,70 |
| C75 | EXT | 74,640 | 71,040 | 75,280 | 81,663 | 69,687 | 161 | 0,00621118 | -3,05 |
| C75 | INT | 72,788 | 70,510 | 66,397 | 61,089 | 65,129 | 161 | 0,00621118 | 3,05 |
| C76 | EXT | 82,353 | 78,887 | 78,620 | 77,810 | 74,688 | 200 | 0,005 | -1,00 |
| C76 | INT | 83,318 | 80,365 | 78,546 | 77,010 | 74,295 | 200 | 0,005 | 1,00 |
| C81 | EXT | 89,720 | 87,962 | 81,681 | 79,674 | 82,229 | 1000 | 0,001 | 4,10 |
| C81 | INT | 84,688 | 88,513 | 83,541 | 80,928 | 80,554 | 1000 | 0,001 | -4,10 |

A estatística descritiva dos dados e a estimação dos modelos foram feitas utilizando-se o *software* Minitab 19. Os resultados obtidos estão descritos no tópico 4.5.

4.5 ESTIMAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL PARA DIFERENTES TIPOS DE VEÍCULOS DE CARGA

Os modelos de estimativa da velocidade operacional para veículos de passeio em função das características planimétricas são considerados por grande parte dos pesquisadores como os mais representativos do comportamento do condutor, porém, como visto no tópico 2.3.1.3, os perfis de velocidade dos veículos pesados dependem tanto da planimetria como da altimetria.

Para este estudo, são apresentados os modelos estimados a partir da base de dados apresentada na Tabela 28, considerando as seguintes variáveis independentes: raio ou inverso do raio, inclinação da rampa e bordo (externo ou interno) por tipo de categoria de veículo de carga.

Inicialmente foi estimado um modelo utilizando-se todas as variáveis independentes. Porém, algumas variáveis não apresentaram resultados estatisticamente significativos para o nível de significância de 5%, ou seja, apresentaram valores de $p > 0,05$. Cada variável não significativa foi sendo retirada do modelo, sendo, após sua retirada, testados modelos parciais por intervalo de inclinação de rampa, procurando chegar em modelos em que todas as variáveis

fossem estatisticamente significativas. As Tabela 29, Tabela 30, Tabela 31, Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34 apresentam os resultados obtidos para cada modelo estimado.

Tabela 29 - Modelo 1 – considerando as variáveis veículo, bordo, raio e inclinação da rampa

| Tipo Veículo (Bordo) | Modelo | Coefficiente de Determinação (R²) |
|-----------------------------|--|---|
| ART4 (BI) | $V_{85p} = 77,23 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | 0,462 |
| ART4 (BE) | $V_{85p} = 77,03 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| ART5 (BI) | $V_{85p} = 74,49 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| ART5 (BE) | $V_{85p} = 74,30 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| ART6 (BI) | $V_{85p} = 71,74 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| ART6 (BE) | $V_{85p} = 71,54 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| TB2 (BI) | $V_{85p} = 82,64 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| TB2 (BE) | $V_{85p} = 82,44 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| TB3 (BI) | $V_{85p} = 78,14 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| TB3 (BE) | $V_{85p} = 77,94 + 0,0098 \times R + 0,072 \times I$ | |
| p-valor | | |
| 0,002(TV) 0,912(B) | 0,000 (β ₀) 0,000(R) 0,024(I) | - |

Onde:

V_{85p} = velocidade operacional potencial [km/h]

R = raio da curva [m]

I = declividade longitudinal

BE = bordo externo

BI = bordo interno

TV = tipo de veículo

O modelo 1 apresenta valor do coeficiente de determinação acima de 0,38, o que indica que se trata de um bom modelo comportamental (GARCÍA, 2002). Porém foi descartado, pois a variável bordo não foi significativa a 95% de confiança, apresentando $p\text{-value} > 0,05$.

Neste modelo 1, foi possível verificar o comportamento em relação ao bordo (interno ou externo), através da análise do coeficientes β_0 . Caso o nível de significância fosse menor, essa variável poderia indicar que os veículos que trafegam no bordo interno são mais rápidos dos que trafegam no bordo externo. Isso demonstraria que ao trafegar no bordo interno, o condutor tem maior segurança.

Tabela 30 - Modelo 2 - considerando as variáveis veículo, raio e inclinação da rampa

| Tipo Veículo | Modelo | Coefficiente de Determinação (R ²) | |
|----------------|---|--|---|
| ART4 | $V_{85p} = 77,13 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$ | 0,462 | |
| ART5 | $V_{85p} = 74,40 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$ | | |
| ART6 | $V_{85p} = 71,64 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$ | | |
| TB2 | $V_{85p} = 82,54 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$ | | |
| TB3 | $V_{85p} = 78,04 + 0,0098 \times R + 0,0724 \times I$ | | |
| p-valor | | | |
| 0,002 | 0,000 (β ₀) | 0,000(R) 0,013(I) | - |

Onde:

V_{85p} = velocidade operacional potencial [km/h]

R = raio da curva [m]

I = declividade longitudinal

Para o modelo 2, foi eliminada a variável bordo. E o modelo 2 se mostrou estatisticamente válido, apresentando coeficiente de determinação (R²) de 0,462. O valor permaneceu igual ao modelo 1. Mesmo eliminando a variável bordo, este modelo não apresentou melhor ajuste como era inicialmente esperado.

Tabela 31 - Modelo 3 - considerando as variáveis veículo, inverso do raio e inclinação da rampa

| Tipo Veículo | Modelo | Coefficiente de Determinação (R ²) | |
|----------------|---|--|---|
| ART4 | $V_{85p} = 86,77 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$ | 0,4082 | |
| ART5 | $V_{85p} = 84,04 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$ | | |
| ART6 | $V_{85p} = 81,28 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$ | | |
| TB2 | $V_{85p} = 92,18 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$ | | |
| TB3 | $V_{85p} = 87,68 + 1303 \times \frac{1}{R} + 0,0724 \times I$ | | |
| p-valor | | | |
| 0,003 | 0,000 (β ₀) | 0,001(R) 0,017(I) | - |

Onde:

V_{85p} = velocidade operacional potencial [km/h]

R = raio da curva [m]

I = declividade longitudinal

No modelo 3, a variável planimétrica utilizada foi o inverso do raio. O modelo 3 também se mostrou estatisticamente válido, porém o coeficiente de determinação (R^2) de 0,4082 foi menor do que o do modelo 2. Portanto, a variável inverso do raio se mostrou menos representativa do comportamento do condutor visto que resultou em um ajuste inferior ao modelo 2.

Com o intuito de melhorar o ajuste dos modelos, foram gerados modelos parciais para os três níveis de intervalos de rampa (em nível, aclive e declive). Resultando nos modelos 4,5 e 6 (Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34).

Tabela 32 - Modelo 4 - em nível: $+2\% \leq i \leq -2\%$ - considerando as variáveis veículo e raio

| Tipo Veículo | Modelo | Coefficiente de Determinação (R^2) | |
|---------------------|--------------------------------------|--|---|
| ART4 | $V_{85p} = 81,10 + 0,00823 \times R$ | 0,6112 | |
| ART5 | $V_{85p} = 77,80 + 0,00823 \times R$ | | |
| ART6 | $V_{85p} = 75,90 + 0,00823 \times R$ | | |
| TB2 | $V_{85p} = 88,93 + 0,00823 \times R$ | | |
| TB3 | $V_{85p} = 81,72 + 0,00823 \times R$ | | |
| p-valor | | | |
| 0,001 | 0,000 (β_0) | 0,003(R) | - |

Onde:

V_{85p} = velocidade operacional potencial [km/h]

R = raio da curva [m]

I = declividade longitudinal

Tabela 33 - Modelo 5 – aclive: $i > +2\%$ - considerando as variáveis veículo e raio

| Tipo Veículo | Modelo | Coefficiente de Determinação (R^2) | |
|---------------------|--------------------------------------|--|---|
| ART4 | $V_{85p} = 67,25 + 0,01809 \times R$ | 0,8485 | |
| ART5 | $V_{85p} = 61,69 + 0,01809 \times R$ | | |
| ART6 | $V_{85p} = 60,55 + 0,01809 \times R$ | | |
| TB2 | $V_{85p} = 72,74 + 0,01809 \times R$ | | |
| TB3 | $V_{85p} = 69,61 + 0,01809 \times R$ | | |
| p-valor | | | |
| 0,040 | 0,000 (β_0) | 0,000(R) | - |

Onde:

V_{85p} = velocidade operacional potencial [km/h]

R = raio da curva [m]

I = declividade longitudinal

Tabela 34 - Modelo 6 - declive: $i < -2\%$ - considerando as variáveis veículo e raio

| Tipo Veículo | Modelo | Coefficiente de Determinação (R^2) |
|----------------|-------------------------------------|--|
| ART4 | $V_{85p} = 77,94 + 0,0067 \times R$ | 0,3899 |
| ART5 | $V_{85p} = 79,17 + 0,0067 \times R$ | |
| ART6 | $V_{85p} = 73,10 + 0,0067 \times R$ | |
| TB2 | $V_{85p} = 78,43 + 0,0067 \times R$ | |
| TB3 | $V_{85p} = 77,99 + 0,0067 \times R$ | |
| p-valor | | |
| 0,671 | 0,000 (β_0) | 0,101(R) |
| | | - |

Onde:

V_{85p} = velocidade operacional potencial [km/h]

R = raio da curva [m]

I = declividade longitudinal

Para os modelos parciais 4, 5 e 6, percebe-se que apenas os modelos 4 e 5 atenderam a todos os critérios: (i) variáveis significativas para o nível de significância de 5%, (ii) R^2 aceitáveis e maiores que os demais modelos, 0,6112 e 0,8485, respectivamente; (iii) resíduos bem distribuídos e (iv) modelo estatisticamente significativo. Já o modelo 6 apresentou duas variáveis com $p\text{-value} > 0,05$, o raio e o tipo de veículo, por este motivo foi descartado.

Analisando os valores dos coeficientes β_0 de todos os modelos gerados, é possível identificar padrões de comportamento do condutor esperados. Ficou demonstrado em todos os modelos, que os veículos menores (TB2 e TB3) são mais rápidos do que os maiores. Porém, apenas no modelo 1 foi possível verificar o comportamento em relação ao bordo, caso o nível de significância fosse menor, poderia indicar que os veículos que trafegam no bordo interno são mais rápidos dos que trafegam no bordo externo. O que demonstraria que o condutor tem mais segurança ao trafegar no bordo interno.

Analisando-se os coeficientes β_0 de todos os modelos gerados, também é possível perceber que a velocidade operacional estimada é maior para os veículos menores (TB2 e TB3) em comparação com os mais robustos (ART4, ART5 e ART6).

Analisando os modelos parciais 5 e 6, é possível comparar os comportamentos dos condutores em aclive e declive. Os coeficientes de determinação R^2 são 0,8584 (modelo 5) e 0,3899 (modelo 6), caracterizando, assim, que a variabilidade da velocidade operacional dos veículos de carga em aclive é menor e o modelo 5 tem uma capacidade de melhor estimativa.

De forma a validar os modelos 4 e 5, foram aplicadas as equações de cada modelo para estimar a velocidade operacional e comparar com os valores observados presentes na parte da amostra que não foi utilizada no desenvolvimento do modelo. Os dados das variáveis explicativas, bem como da velocidade operacional observada são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Base de dados para validação – parte 2 da amostra

| CURVA | BORDO | V85 (km/h) | | | | | RAIO (m) | i (%) |
|-------|-------|------------|--------|--------|--------|--------|----------|-------|
| | | TB2 | TB3 | ART4 | ART5 | ART6 | | |
| C33 | EXT | 97,165 | 85,446 | 87,496 | 82,303 | 80,607 | 900 | 0,69 |
| C33 | INT | 105,538 | 88,410 | 87,746 | 84,464 | 83,602 | 900 | -0,69 |
| C37 | EXT | 97,875 | 86,766 | 86,497 | 77,005 | 79,486 | 143,27 | 1,23 |
| C37 | INT | 92,622 | 82,677 | 89,540 | 81,192 | 85,249 | 143,27 | -1,23 |
| C47 | EXT | 80,932 | 74,430 | 78,840 | 68,075 | 57,310 | 235 | 4,70 |
| C47 | INT | 83,959 | 84,652 | 82,508 | 81,937 | 81,442 | 235 | -4,70 |
| C75 | EXT | 74,814 | 69,482 | 76,852 | 76,370 | 68,930 | 161 | -3,05 |
| C75 | INT | 71,380 | 68,176 | 70,893 | 60,204 | 66,176 | 161 | 3,05 |
| C76 | EXT | 87,580 | 78,113 | 80,696 | 76,570 | 75,680 | 200 | -1,00 |
| C76 | INT | 84,891 | 78,120 | 78,788 | 77,120 | 74,205 | 200 | 1,00 |
| C81 | EXT | 88,721 | 82,968 | 81,638 | 82,025 | 85,615 | 1000 | 4,10 |
| C81 | INT | 91,100 | 86,651 | 84,578 | 82,503 | 81,743 | 1000 | -4,10 |

Os resultados obtidos na aplicação dos dois modelos aos dados da Tabela 35 são apresentados nas tabelas Tabela 36 e Tabela 37. Para ambos modelos foram realizados gráficos comparativos entre os valores observados e estimados, incluindo o boxplot destes valores e o boxplot das diferenças (Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24).
19 - Valores Observados x Estimados – modelo 4 (em nível)).

Tabela 36 - Resultados da validação do modelo 4 - em nível

| V ₈₅ Observada (km/h) | V ₈₅ Estimada (km/h) | Diferença absoluta (km/h) |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 87,496 | 88,507 | 1,011 |
| 87,746 | 88,507 | 0,761 |
| 86,497 | 82,279 | -4,218 |
| 89,540 | 82,279 | -7,261 |
| 80,696 | 82,746 | 2,050 |
| 78,788 | 82,746 | 3,958 |
| 82,303 | 85,207 | 2,904 |
| 84,464 | 85,207 | 0,743 |
| 77,005 | 78,979 | 1,974 |
| 81,192 | 78,979 | -2,213 |
| 76,570 | 79,446 | 2,876 |
| 77,120 | 79,446 | 2,326 |
| 80,607 | 83,307 | 2,701 |
| 83,602 | 83,307 | -0,295 |
| 79,486 | 77,079 | -2,407 |

| V₈₅ Observada (km/h) | V₈₅ Estimada (km/h) | Diferença absoluta (km/h) |
|--|---|--------------------------------------|
| 85,249 | 77,079 | -8,170 |
| 75,680 | 77,546 | 1,866 |
| 74,205 | 77,546 | 3,341 |
| 97,165 | 96,337 | -0,828 |
| 105,538 | 96,337 | -9,201 |
| 97,875 | 90,109 | -7,766 |
| 92,622 | 90,109 | -2,513 |
| 87,580 | 90,576 | 2,996 |
| 84,891 | 90,576 | 5,685 |
| 85,446 | 89,127 | 3,681 |
| 88,410 | 89,127 | 0,717 |
| 86,766 | 82,899 | -3,866 |
| 82,677 | 82,899 | 0,222 |
| 78,113 | 83,366 | 5,253 |
| 78,120 | 83,366 | 5,246 |

Como pode ser visto pelos resultados obtidos na Tabela 36, a diferença absoluta entre os valores observados e estimados é baixa. Apenas dois valores ficaram acima de 6 km/h.

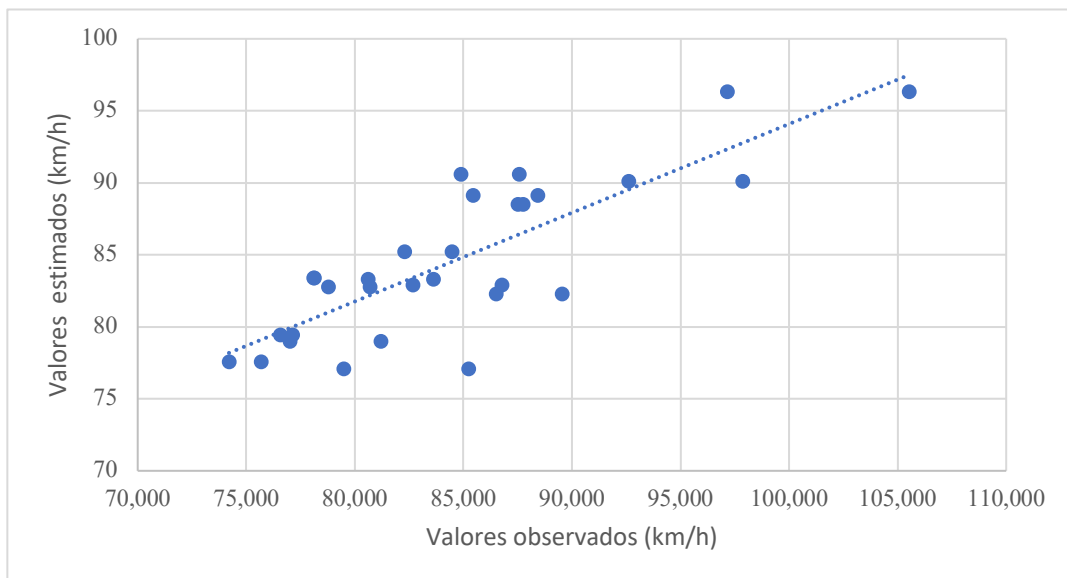


Figura 19 - Valores Observados x Estimados – modelo 4 (em nível)

No gráfico da Figura 19, verifica-se que as diferenças são tanto para cima (valores positivos) como para baixo (valores negativos), o que indica que há uma dispersão e não um padrão de comportamento. Essa dispersão indica a aleatoriedade.

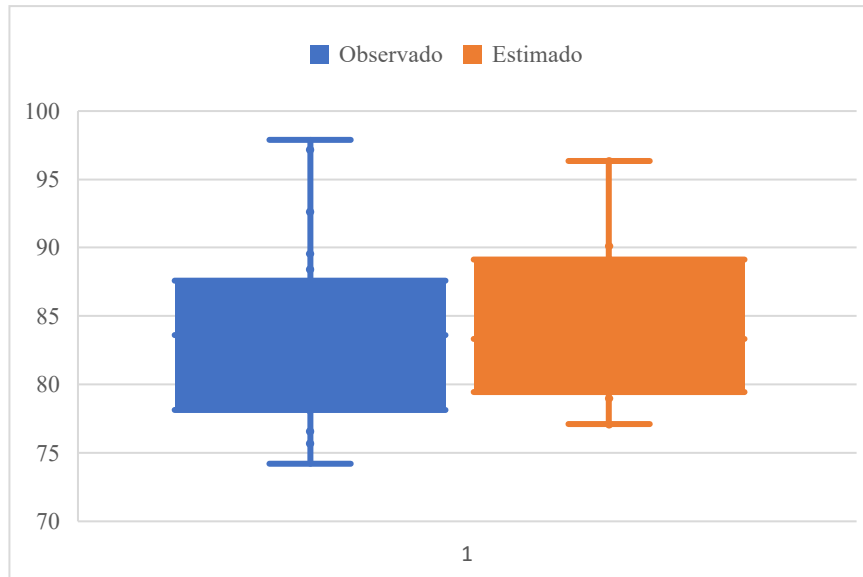


Figura 20 - BoxPlot - valores observados e estimados - modelo 4 (em nível)

Os boxplot da Figura 20 são muito próximos nos valores das médias e nos quartis, o que indica uma boa capacidade de explicação do modelo. Percebe-se que valores menores de velocidade, o modelo não tem condições de capturar.

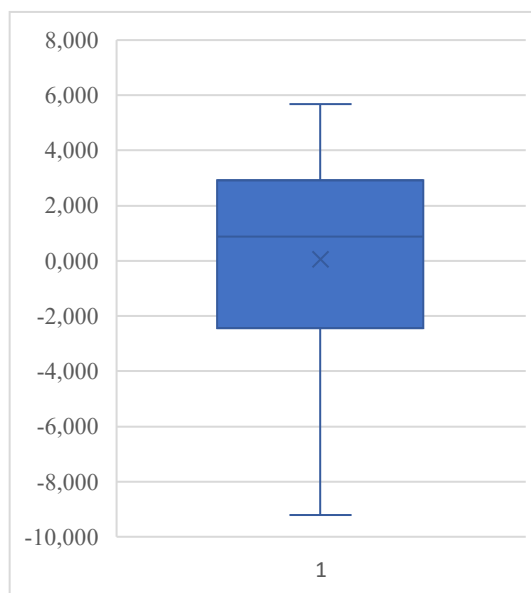


Figura 21 - BoxPlot - Diferenças - modelo 4 (em nível)

A figura 21 apresenta o boxplot das diferenças do modelo 4 (em nível). É possível perceber que o valor médio da diferença está próximo de zero, o que indica um bom ajuste. Percebe-se, também, que os principais quartis da distribuição apresentam limites próximos a 2 km/h.

Tabela 37 - Resultados da validação do modelo 5 - aclave

| V₈₅ Observada (km/h) | V₈₅ Estimada (km/h) | Diferença absoluta (km/h) |
|--|---|--------------------------------------|
| 78,840 | 71,501 | -7,339 |
| 70,893 | 70,162 | -0,730 |
| 81,638 | 85,340 | 3,702 |
| 68,075 | 65,941 | -2,134 |
| 60,204 | 64,602 | 4,399 |
| 82,025 | 79,78 | -2,245 |
| 57,310 | 64,801 | 7,491 |
| 66,176 | 63,462 | -2,714 |
| 85,615 | 78,64 | -6,974 |
| 80,932 | 76,991 | -3,941 |
| 71,380 | 75,652 | 4,273 |
| 88,721 | 90,83 | 2,110 |
| 74,430 | 73,861 | -0,569 |
| 68,176 | 72,552 | 4,376 |
| 82,968 | 87,700 | 4,733 |

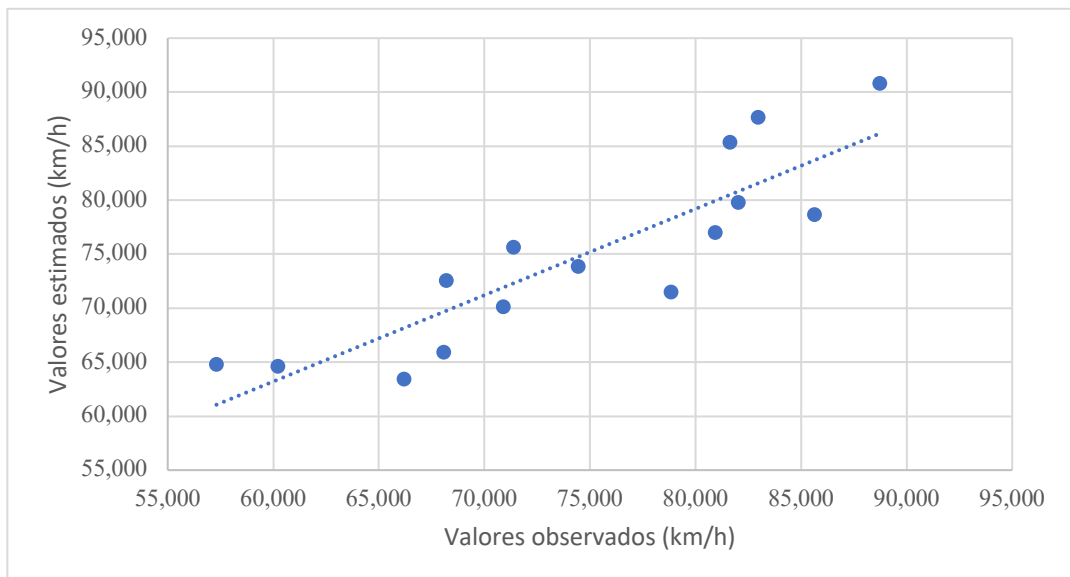


Figura 22 - Valores Observados x Estimados - modelo 5 (aclave)

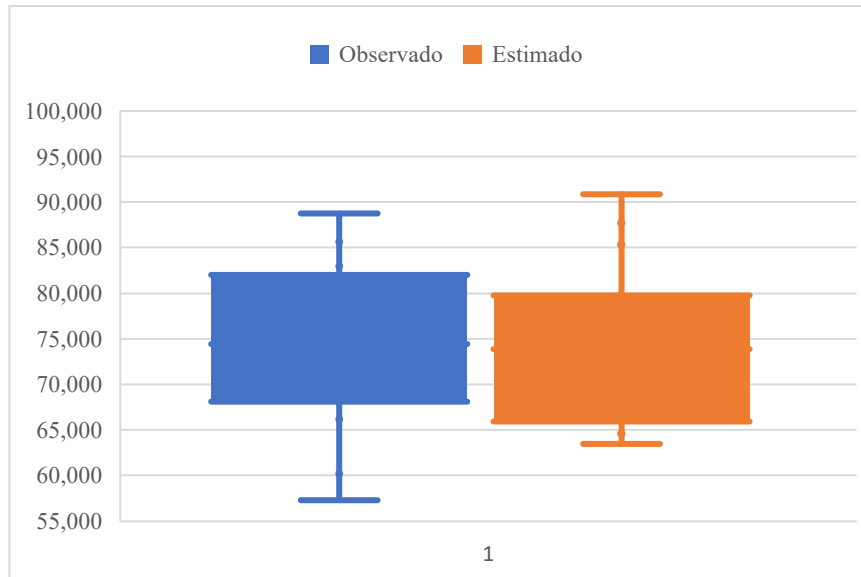


Figura 23 - BoxPlot - Observados e Estimados - modelo 5 (ativo)

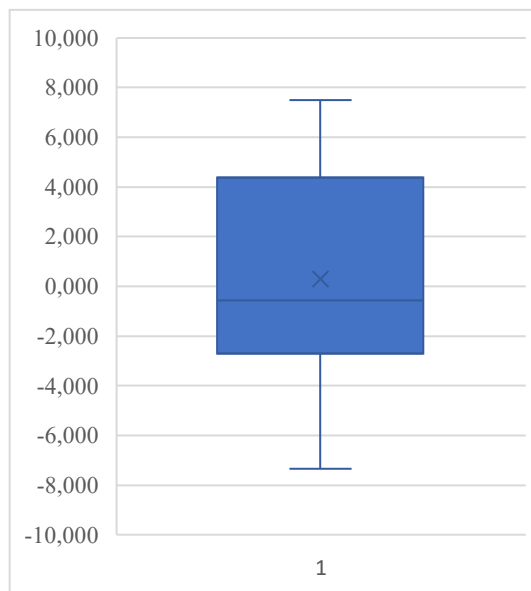


Figura 24 - BoxPlot - Diferenças - modelo 5 (ativo)

Analisando os gráficos fica evidente que existem tanto valores acima da linha como abaixo, ao longo dos gráficos da Figura 19 e da Figura 22, indicando uma dispersão aleatória e não tendenciosa. Os gráficos boxplot dos valores estimados está próximo do dos valores observados para dois modelos (Figura 20 e Figura 23). E os gráficos boxplot das diferenças (Figura 21 e Figura 24) possuem média próxima a zero e quartis positivos e negativos.

Analisando os resultados obtidos verifica-se a capacidade dos modelos gerados em explicar o comportamento da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga em rodovias de pistas simples, especificamente para os casos em aclive e em nível (modelos 4 e 5).

Comparando os modelos 4 (em nível) e 5 (em aclive) percebe-se há alteração maior na velocidade operacional em relação a inclinação. Ao analisarmos os coeficientes β_0 de cada modelo, é possível identificar a variação maior no modelo em nível do que no modelo em aclive.

O modelo 6 (em declive) não se mostrou estatisticamente significativo, apresentando grande variabilidade nos resultados da velocidades operacionais. Tal situação pode ter ocorrido em função da condução tipo “banguela”, a qual não foi considerada no estudo, e também pelo fato dos veículos de carga estarem ou não carregados. Estas condições afetam consideravelmente a velocidade operacional.

Os modelos gerados para situação em nível (modelo 4) e em aclive (modelo 5) poderão ser extrapolados para rodovias com as mesmas características técnicas que a rodovia estudada.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Conhecer o perfil da velocidade operacional ao longo de segmentos de uma via é de grande importância para diferentes análises que envolvam o desempenho dos veículos no fluxo de tráfego. A velocidade operacional é um parâmetro de resposta dos condutores, por este motivo este dado não é conhecido no momento da elaboração do projeto. Sendo assim a velocidade operacional estimada por modelos se torna essencial e tem diferentes aplicações. Entre elas destacam-se: (i) uso na análise da consistência geométrica; (ii) como input de softwares de modelagem de tráfego e (iii) em estudos para a definição da velocidade limite.

Pesquisas que ampliem o conhecimento sobre o real desempenho dos veículos de carga em rodovias de pista simples no que tange a velocidade operacional, são de grande importância para estudos de segurança viária. Especialmente no cenário brasileiro, onde a maioria das rodovias são de pista simples com a presença de elevado transporte de cargas no modo rodoviário. Além disso, estes veículos apresentam grande variedade de tipos com impacto diferente no desempenho da rede viária.

Neste contexto, o presente trabalho se propôs a medir a velocidade operacional dos veículos de carga que trafegam por rodovias de pista simples em condições de fluxo livre para trajetos em curva, considerando separadamente dados da parte externa e interna da curva. Com base nessas medições foi possível desenvolver modelos de estimativa da velocidade operacional segundo características geométricas da via para diferentes tipologias de veículos de carga, atendendo-se assim ao objetivo geral deste estudo.

Entre as principais dificuldades enfrentadas no estudo realizado está a tecnologia usada para medição das velocidades. Os equipamentos usados da *MetroCount* (MC-5600), que funcionam através de sistema pneumático, exigiram a presença de equipes de apoio para a fiscalização dos levantamentos. Apesar de fácil instalação e desinstalação dos tubos pneumáticos, a fixação destes exige parafusos especiais que possuem valor elevado, associada a necessidade de vigia permanente dos equipamentos para evitar furtos e/ou vandalismos.

Diferentemente do que ocorre no levantamento de velocidades operacionais de veículos de passeio, quando se tratará de veículos de carga é esperado que a velocidade operacional dos veículos carregados seja menor que a dos veículos não carregados. No entanto, os equipamentos

utilizados não permitiram tal diferenciação, o que se constitui em uma limitação do método adotado.

Os resultados obtidos confirmaram a capacidade de explicar o comportamento da velocidade operacional para diferentes tipos de veículos de carga através de modelos de estimativa com as características geométricas de rodovias de pistas simples. O presente trabalho estudou dados para sete tipos diferentes de veículos de carga, sendo que para cinco foram obtidos modelos com boa capacidade explicativa. Como principais resultados do trabalho têm-se:

- **Identificação de diferentes padrões de comportamento quanto a velocidade operacional:** a velocidade operacional dos veículos de carga em trajetória do lado externo das curvas tende a ser menor que do lado interno; a velocidade operacional varia conforme o tipo de veículo de carga, sendo maior para os veículos de menor porte em relação aos de maior porte;
- **Importância da inclinação longitudinal para os veículos de carga:** a velocidade operacional dos veículos de carga altera significativamente conforme a variação da inclinação, sendo maior em nível do que em aclave;
- **Intervalo de validade dos modelos:** os modelos estimados possuem validade para intervalos entre 140 e 1000 metros para o raio e 0% e +/- 5% para rampas;
- **Coefficientes de determinação:** para aclave, foi obtido modelo com coeficiente de determinação $R^2=0,8485$ e para nível, o coeficiente foi de $R^2=0,6112$. Portanto, o modelo para aclave se mostrou mais robusto;
- **Variabilidade maior para as velocidades operacionais em declive:** provavelmente em decorrência do padrão de condução dos condutores do tipo “banguela” e possivelmente pelo fato dos veículos de carga estarem ou não carregados.

A modelagem da velocidade operacional de diferentes tipologias de veículos de carga se constitui na principal contribuição do presente estudo. Tais modelos tem aplicação direta em estudos sobre Segurança Viária e de micro simulação, sendo portanto, relevantes no avanço de pesquisas nessas áreas do conhecimento.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se como tema para trabalhos futuros ou prosseguimento deste estudo, que sejam estudadas algumas questões que fugiram do escopo deste estudo:

- Ampliar o intervalo de estudo dos modelos, visto que os aqui estudados possuem validade para curvas com raios entre 140 e 1000 metros e rampas entre 0% e +/- 5%;
- Ampliar a base de dados para mais tipos de veículos de carga, e diferentes rodovias de outros estados, afim de obter uma base mais robusta;
- Obter padrões de comportamento em tangente (reta) e informações que permitam construir modelos de estimativa das acelerações e desacelerações;
- Incluir a variável 'Com Carga' ou 'Sem Carga' no estudo, para identificar se há e, caso haja, qual seu impacto no desempenho dos veículos.

REFERÊNCIAS

- BARROSO JUNIOR, Gilvan Teles. **A letalidade dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras**. 2018. IBGE - Escola Nacional de Ciências Estatísticas, 2018.
- BARROSO JUNIOR, Gilvan Teles; BERTHO, Ana Carolina Soares; VEIGA, Alinne de Carvalho. A letalidade dos acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 36, p. 1–22, 2019.
- BONNISON, James A.; PRATT, Michael P. Model for predicting speed along horizontal curves on two-lane highways. **Transportation Research Record**, n. 2092, p. 19–27, 2009.
- CAMACHO TORREGROSA, Francisco Javier; ZURIAGA, Ana María Pérez; GARCÍA, Alfredo García. New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation. **Accident Analysis & Prevention**, v. 61, p. 33–42, 2013.
- CASTRO, María et al. Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 22, n. 5, p. 325–331, 2008.
- CNT. **Pesquisa CNT de rodovias**. Brasília, 2019.
- COELHO, Heleny da Silva. **Análise da influência das características físico-operacionais das vias na ocorrência de acidentes de trânsito nas rodovias federais**, 1999.
- DE ANDRADE, Flávia Reis; FERREIRA ANTUNES, José Leopoldo. Trends in the number of traffic accident victims on Brazil's federal highways before and after the start of the Decade of Action for Road Safety. **Cadernos de Saude Publica**, v. 35, n. 8, p. 1–11, 2019.
- DER/SP. **Notas técnicas de projeto geométrico**, 2006.
- DNER. **Projeto rodovias rurais**, 1999.
- DNIT. Manual de estudos de tráfego. **Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR**, p. 384, 2006.
- DONNELL, Eric T. et al. Speed prediction models for trucks on two-lane rural highways. **Transportation Research Record**, v. 1987, n. 1751, p. 44–55, 2001.
- ECHAVEGUREN, Tomás (Universidad de Concepción); DÍAZ, Álvaro (Universidad de Concepción). Operating speed profiles for single horizontal curves (Perfiles de velocidad de

operacion para curvas horizontales aisladas), n. May, 2014.

EPL; ONTL. **Diagnóstico logístico 2010-2018**, 2018.

FHWA. Mitigation Strategies for Design Exceptions Report No FHWA-SA-07-011. **Security**, n. July, 2007.

FITZPATRICK, K. et al. **Design Speed, Operating Speed and Posted Speed Practices**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2003.

FITZPATRICK, Kay et al. Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways. **Fhwa-Rd-99-171**, n. 99, p. 1–217, 2000.

GARACH MORCILLO, Laura. **Consistency measure in two-lane rural highways and its relation to road safety: application to the province of Granada**, 2014.

GARBER, N. J.; EHRHART, A. A. Effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash frequency for two-lane highways. **Transportation Research Record**, n. 1717, p. 76–83, 2000.

GARCÍA, Daniel Sergio Presta. **Método para Análise da consistência geométrica de Rodovias Brasileiras de Pista Simples**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

GARCÍA, Daniel Sérgio Presta. **Elaboração De Modelo De Previsão Da Velocidade Operacional E Classificação De Rodovias Do Estado Do Rio Grande Do Sul Quanto a Sua Consistência Geométrica**, Univesidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

GIBREEL, G. M.; EASA, S. M.; EL-DIMEERY, L. A. Prediction of operation Speed on three-dimensional highway alignments. **Journal of Transportation Engineering**, p. 21–30, 2001.

HARWOOD, DOUGLAS W. et al. **Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design**, Transportation Research Board, 2003.

HOLCOMB, John P. et al. **Applied Regression Analysis** **Applied Regression Analysis: A Research Tool**, v. 53, 1999.

IPEA. Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: Caracterização, tendências e custos para a sociedade. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, p. 42, 2015.

IPEA. Estimativa dos Custos dos Acidentes de Trânsito no Brasil com Base na Atualização Simplificada das Pesquisas Anteriores do Ipea. **Relatório de Pesquisa do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, p. 20, 2015. b.

ISLAM, M.; SENEVIRATNE, P. Evaluation of design consistency of two-lane rural highways. **ITE journal**, v. 64, n. 2, p. 28–31, 1994.

ITE. **Manual of transportation engineering studies**Choice Reviews OnlineWashington, D.C.Institute of Transportation Engineers, , 1994.

JACOB, Anitha; ANJANEYULU, M. V. L. R. Operating Speed of Different Classes of Vehicles at Horizontal Curves on Two-Lane Rural Highways. **Journal of Transportation Engineering**, v. 139, n. 3, p. 287–294, 2013.

JACQUES, M. A. P.; STUMPF, M. T. Modelos para Representação da Velocidade do Tráfego Junto às Barreiras Eletrônicas. **Engenharia de Tráfego e Transportes 2000: Avanços para uma Era de Mudanças – XI Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte**, v. 13, n. 103–115, 2000.

JESSEN, Daniel R. et al. Operating speed prediction on crest vertical curves of rural two-lane highways in Nebraska. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1751, p. 67–75, 2001.

LABORATÓRIO DE TRANSPORTES – LABTRANS. **Análise e tratamento estatístico dos resultados de contagens de tráfego**DNIT/UFCS, 2008.

LAMM, R. et al. Comparison of operating speed on dry and wet pavement of two lane rural highways. **Transportation Research Record**, v. 1280, n. 1122, p. 199–207, 1990.

LAMM, R.; PSARIANOS, B.; MAILAENDER, T. **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**, 1999.

LAMM, Ruediger; GUENTHER, Artur K.; CHOUEIRI, Elias M. Safety module for highway geometric design. **Transportation Research Record**, n. 1512, p. 7–15, 1995.

LEISCH, Jack E.; LEISCH, Joel P. New Concepts in Design-Speed Application. **Transportation Research Record 631, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 4–14.**, p. pp,4-14, 1977.

LIMA, Ieda et al. Fatores condicionantes da gravidade dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras. **Discussion Papers**, 2008.

LLOPIS-CASTELLÓ, David et al. Speed Prediction Models for Trucks on Horizontal Curves of Two-Lane Rural Roads. **Transportation Research Record**, v. 2672, n. 17, p. 72–82, 2018.

MENEGUZZI, Giovanni; RIVA, Rogério Dias Dalla. Elaboração de Modelo de Previsão da Velocidade Operacional e Classificação da Rodovia Estadual MT-449 Quanto a sua Consistência Geométrica Resumo : Elaboration of Operating Speed Forecasting Model and State Highway MT-449 Evaluation Regarding its Geometri. **I Congresso das Engenharias do Estado de Mato Grosso**, 2017.

MINERVI, Nivaldo Aparecido. **Análise fatorial e de séries temporais aplicadas às séries dos acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras**. 2013. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2013.

MISAGHI, P.; HASSAN, Yasser. Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads. **Journal of Transportation Engineering**, v. 131, n. 6, p. 408–418, 2005.

MT. Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT - Relatório Final, p. 260, 2012.

MTPA. **Corredores Logísticos Estratégicos - Volume I - Complexo de soja e milho**, 2017.

MTPA. **Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária**, 2018.

NODARI, Christine Tessele. **Método de avaliação da segurança potencial de segmentos rodoviários rurais de pista simples**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ONSV; AMBEV; FALCONI. **Retrato da segurança viária no Brasil**, 2014.

ONU. **Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011 – 2020**, 2011.

PAHO. **Status of Road Safety in the Region of the Americas**. Washington, D.C. , 2019.

PENG, Yichuan; GEEDIPALLY, Srinivas; LORD, Dominique. Effect of roadside features on single-vehicle roadway departure crashes on rural two-lane roads. **Transportation Research Record**, n. 2309, p. 21–29, 2012.

PEREIRA NETO, W. A. Análise de fatores intervenientes nas características dimensionais de

segmentos rodoviários sob a óptica da compatibilidade veículo–via, 2007.

PÉREZ ZURIAGA, Ana María; CAMACHO TORREGROSA, Fco. Javier; GARCÍA GARCIA, Alfredo. **La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial**, v. 6, 2011.

POLUS, A.; FITZPATRICK, K.; FAMBRO, D. B. Predicting operating speeds on tangent sections of two-lane rural highways. **Transportation Research Record**, n. 1737, p. 50–57, 2000.

PRF. Polícia Rodoviária Federal, 2019.

TORRES, Ana Luísa Martins. **Análise de consistência de traçado de uma rodovia de múltiplas faixas**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

TRENTIN, Leandro Cardoso. **Análise Crítica De Modelos De Verificação De Consistência De Traçado**, p. 165, 2007.

WHO. **Gestão da velocidade: um manual de segurança viária para gestores e profissionais da área**. 2012.

WHO. Declaração de Brasília: Segunda Conferência Global de Alto Nível sobre Segurança no Trânsito: Tempo de Resultados, p. 18–19, 2015.

WHO (ED.). **Global status report on road safety 2018**. : World Health Organization, 2018.