

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Andrey Zuriel Ebeling Bonatto

**COMPARAÇÃO ENTRE A TRANSFERÊNCIA E O
DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DE
ACIDENTES PARA O CONTEXTO BRASILEIRO**

Porto Alegre

2021

Andrey Zuriel Ebelig Bonatto

Comparação entre a Transferência e o Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Acidentes para o Contexto Brasileiro

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção Mestrado Acadêmico 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.

Orientadora: Christine Tessele Nodari, Dra.

Porto Alegre

2021

Andrey Zuriel Ebelig Bonatto

Comparação entre a Transferência e o Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Acidentes para o Contexto Brasileiro

Esta dissertação foi julgada aprovada 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, Dra.
Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. Alejandro Germán Frank
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Alejandro Ruiz Padillo, Dr. (UFSM)

Professor Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D. (DET/UFC)

Professora Michelle Andrade, Dra. (PPGT/UnB)

AGRADECIMENTOS

Eu não poderia deixar de agradecer a Deus, por tudo o que é e tem feito na minha vida. A toda a minha família, que me tem apoiado de diferentes maneiras, especialmente aos meus pais. À minha amada Suzana, que nesse período tornou-se minha esposa, obrigado pela tua companhia e fé em mim.

Agradeço ao meu colega César Luís Andriola, companheiro de jornada, com quem trabalhei incontáveis horas para preparar a extensa base de dados utilizada neste trabalho. Com a sua parceria, produzimos grandes resultados nos últimos dois anos e espero ainda que muitos outros possam vir.

Agradeço também à minha orientadora, Dra Christine Nodari, a Piti, pela sua sábia orientação, que sempre disponível e atenciosa, me auxiliou nesse período. Agradeço aos professores da banca, pelo tempo e atenção disponibilizados, bem como as contribuições sugeridas. Agradeço a todos os professores do LASTRAN, com quem tenho aprendido continuamente.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especialmente ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), fonte de grande parte dos dados aqui presentes, sendo cortesmente cedidos.

RESUMO

Modelo de Previsão de Acidentes (MPA) está entre os temas mais estudados em Segurança Viária, sendo peça chave do HSM (Manual de Segurança Viária), editado nos Estados Unidos em 2010. Contudo, a sua utilização tem sido pouco explorada no contexto nacional. Dentre os motivos, estão a complexidade do tema e a falta de dados. Porém, devido a recentes avanços na coleta de dados no Brasil, como o registro de acidentes da PRF em coordenadas geográficas, o Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) e o Programa BR-Legal, um extenso banco de dados foi disponibilizado, viabilizando o uso de MPAs em todo o país. Com o objetivo de aprofundar o estudo do tema e entender o melhor caminho para obter um MPA adequado para o Brasil, essa dissertação comparou duas abordagens diferentes: a transferência do modelo do HSM e o desenvolvimento de novos modelos. Para isso foram utilizados dados de 1723,47 quilômetros de rodovias rurais de pista simples no estado do Rio Grande do Sul. O modelo do HSM foi transferido a partir de três diferentes métodos: diretamente, por fatores de calibração e por função de calibração. Também foram desenvolvidos diferentes modelos com a utilização de diferentes variáveis, analisados para dois tipos de segmentação: a segmentação homogênea e a segmentação de acordo com os dados do Programa BR-Legal, do DNIT. Os testes de qualidade dos modelos demonstraram que apesar de o modelo do HSM ser o mais difundido, a sua aplicação direta, e mesmo a sua calibração com um único fator de calibração, como orientado pelo manual, não resultam em uma calibração satisfatória. Uma melhor transferibilidade do modelo é possível através de métodos alternativos, como a função de calibração. O desenvolvimento de novos modelos através do passo a passo demonstrado neste trabalho é uma alternativa viável, podendo apresentar resultados superiores ao da transferência do modelo do HSM e de mais simples utilização, pois possui um número muito menor de variáveis a serem coletadas e introduzidas no modelo.

Palavras-chave: Segurança Viária. Modelos de Previsão de Acidentes, Função de Desempenho da Segurança.

ABSTRACT

Safety Performance Function (SPF) is among the most studied subjects in Road Safety, being a vital part of the HSM (Highway Safety Manual), published in the United States in 2010. However, its use has been little explored in the national context. Among the reasons is the complexity of the theme and the lack of data. However, due to recent advances in Brazil's data collection, such as the registration of PRF crashes in geographical coordinates, the National Traffic Counting Plan (PNCT), and the BR-Legal Program, an extensive database was made available enabling the use of SPFs all over the country. In order to deepen the study of the theme and understand the best way to obtain a SPF suitable for the Brazilian context, this thesis aims to compare two approaches: the transfer of the HSM model and the development of new models. For this, data from 1723.47 kilometers of two-lane rural highways in the state of Rio Grande do Sul were used. The HSM model was transferred to the local scenario using three methods: directly, by calibration factors, and by calibration functions. Different models were also developed using different variables, analyzed for two types of segmentation: homogeneous segmentation and segmentation according to data from the BR-Legal Program, from DNIT. The goodness-of-fit tests demonstrated that although the HSM model is the most widespread, its direct application and even its calibration with a single calibration factor, as guided by the manual, do not result in a satisfactory calibration. Better transferability of the model is possible through alternative methods, such as the calibration function. The development of new SPFs through the step-by-step demonstrated in this study is a viable alternative, which may present results superior to the HSM model's transfer and simpler to use, as it has fewer variables to be collected and introduced.

Key words: Road Safety, Crash Prediction Models, Safety Performance Functions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Registro do número anual registrado e a média anual (esperada) de acidentes.....	8
Figura 2: Classificação da segurança da rede viária do estado de Dakota do Sul.....	11
Figura 3: Diagrama do processo decisório para a elaboração de um MPA.....	18
Figura 4: A organização do fluxo de trabalho para as etapas do método de trabalho	19
Figura 5: Aplicação da função objetivo na ferramenta Solver, do Excel.....	36
Figura 6: Representação esquemática do processo de modelagem de um MPA.....	37
Figura 7: Gráficos CURE para: (a) VDMA; (b) Comprimento do Segmento;	41
Figura 8: Em vermelho, as rodovias gaúchas utilizadas no estudo	45
Figura 9: Representação dos lotes do BR-LEGAL	48
Figura 10: Geração de uma curva horizontal no ROCA	49
Figura 11: Localização dos acidentes registrados em GPS pela PRF	51
Figura 12: Gráficos CURE do MPA do HSM calibrado por um fator de calibração (Cr) ...	59
Figura 13: Gráficos CURE de $N_{previsto}$ para os MPAs do HSM calibrados por múltiplos fatores de calibração para 3 variáveis diferentes.....	61
Figura 14: Gráficos CURE dos MPAs calibrados por Múltiplos fatores de calibração	61
Figura 15: Gráfico CURE dos MPA do HSM calibrado por funções de calibração para o Comprimento do Segmento.....	62
Figura 16: Gráficos CURE para o MPA calibrado pela função de calibração 3.....	63
Figura 17: Gráfico CURE de $N_{previsto}$ para o MPA do HSM calibrado pelas funções de calibração 1 e 2.....	63
Figura 18: Gráfico CURE para o MPA simples para as duas segmentações	64
Figura 19: Gráfico CURE dos MPA com 2 e 3 variáveis para o Comprimento do Segmento	65
Figura 20: Gráfico CURE para cinco MPAs em função do Comprimento do Segmento. ...	68
Figura 21: Gráfico CURE para o MPA transferido pela função de calibração 3 (à esquerda) e pelo modelo 5ART (à direita), em função de $N_{previsto}$	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de calibração para rodovias rurais no Brasil	14
Tabela 2: Dados para a calibração do MPA do HSM para segmentos de pista simples	21
Tabela 3: Exemplo de organização do banco de dados em uma planilha	24
Tabela 4: Distribuição dos acidentes por severidade em segmentos de pista simples	26
Tabela 5: Distribuição padrão do total de acidentes por tipo de colisão para cada nível de severidade em segmentos de rodovias rurais de pista simples	26
Tabela 6: Características do segmento base HSM para rodovias rurais de pista simples. ...	27
Tabela 7: CMF ra para largura da faixa em segmentos rodoviários.....	28
Tabela 8: CMF wra para largura do acostamento em segmentos rodoviários.....	29
Tabela 9: CMF tra para largura e tipo de acostamento em segmentos rodoviários.....	29
Tabela 10: CMF 5 referente ao Tipo de Terreno.....	30
Tabela 11: Proporções de acidentes noturnos para segmentos rodoviários sem iluminação	32
Tabela 12: Fatores de calibração por faixa de valores de VDMA, faixa de comprimento de segmento, presença de curva horizontal e total	34
Tabela 13: Extensão das rodovias utilizadas no estudo.....	46
Tabela 14: Dados coletados para a realização do estudo.....	47
Tabela 15: Proporção da severidade dos acidentes em segmentos de pista simples de acordo com o HSM e os dados da PRF, para as rodovias federais do Rio Grande do Sul.....	52
Tabela 16: Distribuição padrão por tipo de colisão para cada nível de severidade.....	52
Tabela 17: Estatística descritiva de variáveis relacionadas à segmentação homogênea	54
Tabela 18: Estatística descritiva de variáveis relacionadas à segmentação do DNIT	54
Tabela 19: Características do Segmento Homogêneo 1	56
Tabela 20: Resultados para a calibração direta do HSM.....	56
Tabela 21: Resultados da aplicação direta do HSM.....	57
Tabela 22: Fator de calibração estimado por rodovia e severidade, pelo MPA do HSM	58
Tabela 23: Diferentes fatores de calibração para a calibração do MPA do HSM	60
Tabela 24: Funções de calibração utilizadas para calibrar o MPA do HSM.....	61
Tabela 25: MPA simples e os parâmetros estimados para cada segmentação.	64
Tabela 26: MPA simples e os parâmetros para as variáveis T, A e R.....	64
Tabela 27: MPA simples e os parâmetros para a variável P	65

Tabela 28: Valor dos parâmetros estimados para cada MPA.....	66
Tabela 29: Agregação do Nprevisto para o modelo HSM calibrado para os SNVs da BR-116 utilizados na base de dados.....	67
Tabela 30: Comparação entre os MPAs transferidos e desenvolvidos.....	67
Tabela 31: Comparação dos resultados por segmentação	69

LISTA DE ABREVIATURAS

AED – Análise Exploratória de Dados

CMF – Fatores Modificadores de Acidentes

Cr – Fator de Calibração

CURE – Resíduos Acumulados

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura

HSM – Highway Safety Manual

FRM – Fenômeno de Regressão à Média

LLnb – Log-Likelihood do Binomial Negativo

MPA – Modelo de Previsão de Acidentes

PNCT – Plano Nacional de Contagem de Tráfego

PRF – Polícia Rodoviária Federal

SNV – Sistema Nacional Viário

SPF – Safety Performance Function

VDMA – Volume Diário Médio Anual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contexto Geral.....	1
1.2. Tema e Objetivos.....	2
1.3. Justificativa.....	3
1.4. Procedimentos Metodológicos.....	5
1.5. Delimitações.....	5
1.6. Estrutura da Dissertação.....	6
2. MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES.....	8
2.1. Modelos de previsão de acidentes do HSM.....	12
2.2. Desenvolvimento de um MPA.....	15
2.3. Síntese do Capítulo.....	17
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
3.1. Cenário de Estudo.....	19
3.2. Etapas do Método de Trabalho.....	19
3.2.1. Consolidação e Organização da Base de Dados.....	20
3.2.2. Transferência do Modelo do HSM.....	24
3.2.3. Desenvolvimento de um MPA.....	36
3.2.4. Comparação dos Resultados.....	39
3.3. Síntese do Capítulo.....	43
4. RESULTADOS.....	45
4.1. Resultados da Consolidação e Organização da Base de dados.....	45
4.1.1. Características Geométricas das Rodovias.....	46
4.1.2. Dados de Exposição.....	50
4.1.3. Dados de acidentes.....	50
4.1.4. Segmentação.....	53
4.2. Resultados da Transferência do Modelo do HSM.....	55
4.2.1. Aplicação Direta.....	55

4.2.2. Fator de Calibração	57
4.2.3. Função de Calibração	61
4.3. Resultados dos Modelos Desenvolvidos.....	63
4.4. Comparação dos Resultados	66
4.5. Discussão dos Resultados	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1. Conclusões	75
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	76
REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO GERAL

Os acidentes de trânsito são um dos principais problemas de saúde pública presentes no Brasil devido a sua elevada taxa de morbimortalidade, a sobrecarga imposta ao sistema de saúde e a repercussão social decorrente da perda de vidas e das sequelas deixadas (Lima, 2019). Diante dessa realidade, um importante papel da pesquisa no desenvolvimento das políticas de segurança no trânsito é prover informações confiáveis sobre quantos e quais tipos de acidentes e danos podem ser alterados por meio da adoção de diferentes medidas de segurança viária (Elvik, 2009). Adicionalmente, os resultados dessas pesquisas devem ser disseminados e devem subsidiar a melhoria das medidas já existentes ou o planejamento de novas medidas de segurança.

Com o objetivo de consolidar o conhecimento científico existente na área de segurança viária e de apresentar ferramentas padronizadas e aprimoradas para auxiliar a tomada de decisão, diversas entidades de vários países publicaram manuais de gerenciamento da segurança viária. Entre eles estão os manuais Australiano (ANRAM), Neozelandês (*New Zealand Crash Estimation Compendium*) e Europeu (PRACT) (Jurewicz *et al.* (2014); Turner *et al.* (2012); Yannis *et al.* (2015)). O mais estudado e difundido é o Manual de Segurança Viária (HSM - *Highway Safety Manual*), desenvolvido nos Estados Unidos (AASHTO, 2010).

Uma importante ferramenta quantitativa que fundamenta os manuais de gerenciamento da segurança está baseada na utilização de SPF (*Safety Performance Function*), podendo ser traduzido como FDS (Função do Desempenho da Segurança), ou como é mais conhecido no Brasil, MPA (Modelo de Previsão de Acidentes). Trata-se de um modelo estatístico de regressão que permite prever o número de acidentes médio esperado por tipo e/ou severidade a partir das características de um elemento rodoviário. Este elemento pode ser, por exemplo, uma interseção semaforizada ou um segmento rodoviário de pista dupla. Entre as aplicações do MPA estão a detecção de pontos críticos (Ghadi e Török, 2019), a realização de um ranking da rede viária de acordo com a segurança (Ambros *et al.*, 2019) e a realização de estudos antes e depois, úteis para avaliar os efeitos de intervenções viárias, como por exemplo, da duplicação de uma rodovia na segurança viária (Elvik *et al.*, 2017).

Apesar do potencial de uso dos MPAs, um questionário aplicado em 18 países europeus, nos Estados Unidos e na Austrália, revelou que 70% das administrações rodoviárias nacionais e outras organizações responsáveis pela gestão da segurança viária, raramente ou nunca utilizaram tais modelos durante o procedimento de avaliação da segurança viária (Yannis *et al.*, 2016). Quando analisada a realidade brasileira, observa-se que a utilização de MPAs é pouco difundida e se restringe ainda ao ambiente acadêmico, não tendo sido incorporada de maneira significativa na prática dos gestores de transportes.

Yannis *et al.* (2016) ainda verificaram que o uso de MPAs na tomada de decisão é mais comum em países que possuem diretrizes ou manuais consolidados, o que, normalmente, está relacionado a uma cultura de segurança viária mais avançada. O Brasil ainda carece de um manual que explore o potencial do uso de MPAs para o gerenciamento da segurança viária, mas pode usufruir de ferramentas e experiências internacionais existentes. Para o bom aproveitamento dessas ferramentas e experiências internacionais, é necessário que se tenha MPAs que representem a realidade da segurança viária nacional.

1.2. TEMA E OBJETIVOS

O tema de pesquisa desta dissertação contempla os Modelos de Previsão de Acidentes Viários. O tema está focado na obtenção de Modelos de Previsão de Acidentes (MPAs) acessíveis e que possam representar adequadamente a condição da segurança das rodovias brasileiras, a partir do estudo em rodovias do estado do Rio Grande do Sul.

O objetivo geral deste trabalho é comparar duas abordagens para a obtenção de modelos de previsão de acidentes para rodovias de pista simples. Para atingir esse objetivo foram consideradas duas abordagens distintas: (i) a transferência do MPA do HSM, desenvolvido nos Estados Unidos, para o estado do Rio Grande do Sul e (ii) o desenvolvimento de um novo MPA baseado nos dados da própria jurisdição.

Como objetivos específicos deste trabalho tem-se:

- Comparar três métodos de transferência para o MPA do HSM: i) a transferência direta, ii) fatore de calibração e iii) função de calibração para a segmentos rodoviários de pista simples;

- Desenvolver MPAs para rodovias rurais de pista simples para o estado do Rio Grande do Sul a partir da combinação de diferentes variáveis presentes em um banco de dados disponível para todo território nacional, de modo que o método aqui proposto possa ser reproduzido em outros estados brasileiros; e
- Comparar o desempenho dos MPAs desenvolvidos para dois tipos de segmentação: i) a segmentação homogênea e ii) a segmentação gerada a partir dos dados do DNIT.

1.3. JUSTIFICATIVA

O MPA tem um grande potencial para a gestão da segurança viária, no entanto, não é simples de se utilizar. Para que possa ser utilizado em aplicações práticas de uma certa jurisdição, ele deve representar adequadamente suas condições de segurança. Para isto, este modelo pode ser desenvolvido a partir dos dados da jurisdição ou transferido de um modelo desenvolvido para outra jurisdição. Em ambos os casos, o processo de obtenção de um MPA envolve uma grande quantidade de dados geométricos, de tráfego e de acidentes, além de uma grande quantidade de horas de pessoal necessária para a coleta, preparação e modelagem. Estima-se que o número de horas necessárias pode variar de 150 a 350 horas para a calibração de um MPA existente, e de 450 a 1050 horas para o desenvolvimento de um novo modelo (Srinivasan *et al.* 2013).

Os MPAs do HSM foram desenvolvidos para a realidade das vias, dos condutores e do meio ambiente existentes nos Estados Unidos para os anos em que foram desenvolvidos. Para que estes modelos sejam utilizados fora deste contexto, o HSM orienta, no seu Apêndice C, o processo de calibração a partir de uma amostra mínima de 30 a 50 locais, que represente adequadamente as condições físicas e de segurança do elemento analisado.

Diversos estudos apresentam o processo de calibração dos MPAs do HSM. Nos Estados Unidos, Matarage e Dissanayake (2019) realizaram a calibração para o estado do Kansas e Shin *et al.* (2015) para o estado de Maryland. Calibrações do modelo do HSM na Europa, mostraram uma boa transferência para as rodovias alemãs (Moraldi *et al.*, 2019) e italianas (Russo *et al.*, 2016), enquanto os trabalhos de Sacchi *et al.* (2012) e Russo *et al.* (2014) não apresentaram bons resultados, recomendando que a União Europeia desenvolvesse os seus próprios modelos ao

invés de calibrar os modelos propostos no HSM. Mesmo dentro dos Estados Unidos, Qin *et al.* (2016), realizando um estudo para calibrar o modelo do HSM para o estado da Dakota do Sul, verificou ser melhor abandonar a calibração e utilizar modelos desenvolvidos localmente. Resultados parecidos foram obtidos por Kaaf e Abdel-Aty (2015), em que o modelo do HSM mostrou um número significativamente maior de acidentes do que aqueles experienciados na cidade de Riyadh, na Arábia Saudita.

No Brasil, alguns trabalhos efetuaram a transferência do modelo do HSM. A transferência do modelo para interseções urbanas de Fortaleza mostrou bons resultados, ainda que com ressalvas (Cunto *et al.*, 2015). Já estudos realizados para a transferência para segmentos rodoviários apresentaram uma grande diferença entre o número de acidentes previstos e observados, resultando em fatores de calibração superiores a 1, geralmente obtendo valores de medidas de ajuste limitados. Esses trabalhos foram realizados para rodovias rurais de pista simples (Silva, 2012; Silva, 2017; Thomazi, 2018) e dupla (Waihrich, 2015).

Recentemente, diversos trabalhos estudaram tanto a transferibilidade quanto o desenvolvimento de novos modelos. Novos métodos visam aperfeiçoar a transferência de MPAs para outras jurisdições e podem ser uma alternativa ao desenvolvimento de novos modelos, como a utilização de múltiplos fatores de calibração e a função de calibração apresentada por Srinivasan *et al.* (2016), também testados com resultados significativos por Matarage e Dissanayake (2020), Farid *et al.* (2018a) e Li *et al.* (2017).

Apesar de o desenvolvimento de um novo MPA ser dispendioso, ele geralmente apresenta bons resultados, uma vez que é desenvolvido a partir do banco de dados da própria jurisdição (Claros *et al.*, 2018; Farid *et al.* 2018b). Os modeladores têm ainda a possibilidade de testar outras variáveis, diferentes daquelas presentes no HSM, e vários tipos de funções matemáticas, de modo a buscar os melhores resultados de ajuste para o modelo.

Com os recentes avanços na coleta de dados no Brasil, como o registro de acidentes da PRF em coordenadas geográficas (DPRF, 2021), o Plano Nacional de Contagem de Tráfego (DNIT, 2021) e o Programa BR-Legal (DNIT, 2015), juntamente com ferramentas como o Google Earth e ROCA, um extenso banco de dados foi disponibilizado em todo o país. Esse novo cenário possibilita a utilização de MPAs em escala nacional, seja mediante a transferência ou o desenvolvimento de MPAs, contribuindo para as análises em segurança viária. Por isso, este

estudo busca comparar as duas abordagens de modo a evidenciar as potencialidades e dificuldades de transferir o modelo do HSM, desenvolvido para os Estados Unidos, utilizando três métodos diferentes, e desenvolver novos modelos diretamente a partir dos dados brasileiros.

1.4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho é de natureza aplicada, pois os resultados preveem a obtenção de modelos que podem ser usados para estudos práticos em segurança viária para rodovias existentes ou ainda em projeto. Quanto a abordagem, é essencialmente quantitativa, uma vez que o método utiliza preceitos de Estatística. No que tange aos objetivos, o trabalho é classificado como pesquisa explicativa, pois o método proposto permite prever a frequência média de acidentes esperados para um elemento rodoviário em função de suas características geométricas e de tráfego. Por fim, quanto aos procedimentos, o trabalho pode ser caracterizado como um estudo de caso em que é explorada uma situação real de desenvolvimento e transferência de MPAs.

1.5. DELIMITAÇÕES

Esse trabalho se limitou a obter MPAs para trechos de rodovias rurais de pista simples no estado do Rio Grande do Sul. As rodovias de pista simples foram escolhidas pelo fato de representarem 87,6% dos trechos da malha federal pavimentada no país, exatos 57.275 quilômetros (CNT, 2019). Adicionalmente, os acidentes ocorridos em interseções e rotatórias não foram abordados neste estudo. Portanto os modelos propostos são aplicáveis a segmentos rodoviários.

O trabalho utilizou dados de 1723,47 quilômetros de rodovias de pista simples do Estado do Rio Grande do Sul. As rodovias utilizadas neste estudo variam o volume de tráfego entre 639 e 8353 veículos por dia. Devido a obras de duplicação e contagem de tráfego acima do limite superior, este estudo teve de se limitar a uma faixa de valores que cobre rodovias com baixo e médio volume, visto que o modelo para rodovias de pista simples do HSM estima o número de acidentes para rodovias até 17800 veículos por dia. Assim, os modelos estimados refletem as condições associadas a esta faixa de volume de tráfego.

São limitações do estudo a qualidade dos bancos de dados utilizados para a realização do estudo, como os dados de volume de tráfego estimados a partir da modelagem feita com um

número limitado de contadores de tráfego, os dados de acidentes da PRF e os registros do Programa BR-Legal. São limitações de estudo também as suposições feitas no Seção 4.1.1 para os Fatores Modificadores de Acidentes (CMFs) que não tiveram as suas informações coletadas, como por exemplo, a presença de faixa de conversão à esquerda. As ferramentas utilizadas, ROCA e Saepro para obtenção de informações da geometria da via também são uma limitação do estudo, visto que utilizam a informação de satélite para a determinação das curvas horizontais.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. Os elementos textuais foram dispostos do seguinte modo: introdução, referencial teórico, método, resultados e considerações finais.

Neste primeiro capítulo foi apresentada a introdução ao trabalho, composto pelas seções de contexto geral, tema e objetivos, justificativa, delimitações e a estrutura da dissertação. Foi exposta a ideia central do trabalho, bem como, a definição dos objetivos geral e específicos. Apresentou-se também a justificativa do trabalho, focando na comparação entre duas opções para a obtenção de MPAs para rodovias rurais de pista simples para o estado do Rio Grande do Sul.

O desenvolvimento do referencial teórico foi contemplado no segundo capítulo do estudo. Uma exposição sobre “Modelos de previsão de Acidentes” é feita de maneira a expor o tema e orientar o interesse do estudo. Depois de os dois tipos de abordagens utilizadas para a obtenção dos modelos serem apresentados, há a síntese do capítulo.

No terceiro capítulo estão descritos os procedimentos metodológicos empregados no estudo. Estes foram divididos em quatro etapas: a consolidação e organização da base de dados; a transferência do MPA do HSM; o desenvolvimento de novos modelos; e a comparação dos resultados obtidos.

O quarto capítulo apresenta os resultados encontrados para a consolidação e organização da base de dados, a transferência do MPA do HSM, o desenvolvimento de novos modelos e a comparação entre os resultados para a aplicação dos dois modelos na base de dados. A partir da análise dos resultados é realizada a discussão, de modo a entender quais das duas abordagens melhor se aplicada à realidade brasileira.

Por fim, no quinto capítulo são feitas as considerações finais. Nele, além das conclusões acerca da pesquisa desenvolvida, são encontradas as sugestões para trabalhos futuros.

2. MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Um MPA busca quantificar a segurança viária em um determinado local. Mas antes de quantificá-la, é necessário entender o significado adotado para o termo “segurança”. A segurança em uma rodovia pode ser definida de um modo subjetivo e de um modo objetivo (Hauer, 1997). De modo subjetivo, ela depende da percepção de quão seguro o usuário da rodovia se sente, sendo este aspecto de difícil quantificação. Com relação ao aspecto objetivo, Hauer (1997) define a segurança de certo elemento viário (entidade) como “o número de acidentes esperados, por tipo e severidade, em um certo período de tempo”. Deste modo, quanto mais acidentes são registrados em uma rodovia, em um período de tempo (frequência de acidentes), e maior a severidade deles, menos segura ela é.

Com relação à palavra ‘esperados’, Hauer (1997) argumenta que essa diz respeito ao número de acidentes médio esperado para ocorrer no longo prazo, caso não houvesse nenhuma mudança nas características do local analisado. Já Elvik (2009) define o número esperado de acidentes (em uma rodovia ou cruzamento, por exemplo) por unidade de tempo, como o número que seria de se esperar com base em características conhecidas do local. É a melhor estimativa de quantos acidentes devem acontecer, e não o número que é, na verdade, registrado em um determinado período. A partir da Figura 1 é possível diferenciar o que é a média anual de acidentes no período até então analisado e o número de acidentes registrados em um único ano para um dada interseção ou segmento rodoviário.

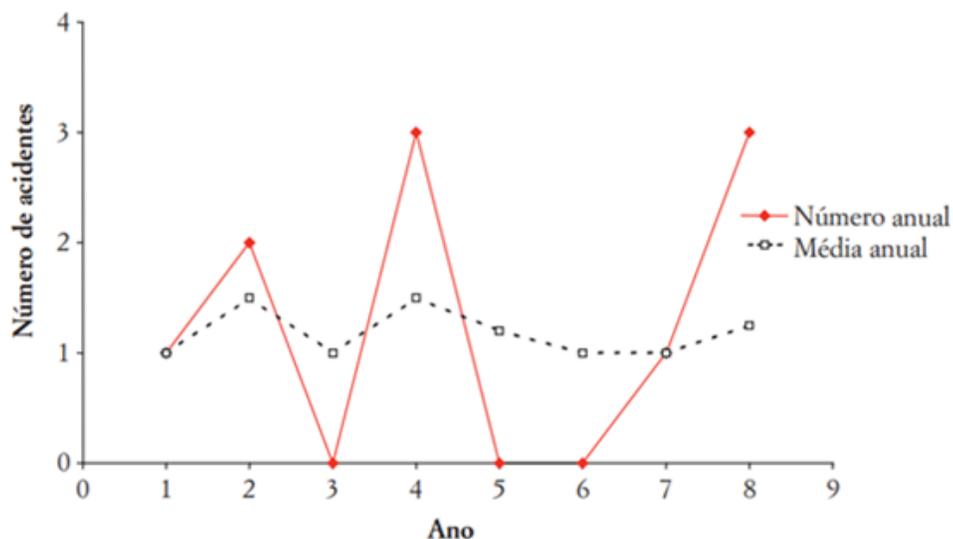


Figura 1: Registro do número anual registrado e a média anual de acidentes.

Fonte: Adaptado de Elvik (2009)

Se no cálculo da média anual fossem considerados apenas os anos 5 e 6 da Figura 1, encontraria-se uma média de 0 acidentes por ano. Todavia, se fossem analisados os anos 7 e 8, a média anual seria de 2 acidentes por ano. Isso mostra a importância de se considerar períodos suficientemente longos para a estimativa do valor esperado de acidentes. Como os acidentes são eventos raros e aleatórios, as frequências dos acidentes são mais bem expressas como uma média de um período de vários anos. Um período de tempo multianual é capaz de lidar melhor com o fenômeno de regressão à média (FRM).

O FRM decorre da tendência de um local em que a frequência de acidentes é maior do que a média, em um dado período de tempo, ter mais chances de observar uma diminuição na frequência de acidentes em um período subsequente, ou o contrário. Esse fenômeno pode comprometer as análises de segurança viária, principalmente se os locais analisados não forem escolhidos aleatoriamente, e sim em função da sua frequência de acidentes. Por isso a importância do MPA que auxilia na determinação da média anual de acidentes.

Para lidar com o FRM, a estimativa do número médio anual de acidentes esperado, determinada pelo MPA, pode ser combinada com o número de acidentes observado para um dado local nos anos anteriores ao período analisado. Esse método é chamado de Método Empírico de Bayes e visa melhorar as estimativas do modelo, bem como a capacidade do modelo de lidar com FRM (Hauer, 1997) e é calculado por meio da Equação 1.

$$N_{esperado} = N_{previsto} \times w + N_{observado} \times (1 - w) \quad (1)$$

Onde:

$N_{esperado}$: Estimativa da frequência média de acidentes esperados;

$N_{previsto}$: Frequência média de acidentes esperados prevista pelo MPA;

$N_{observado}$: Frequência média de acidentes observada; e

w : ajuste do peso a ser colocado no valor de $N_{previsto}$ no resultado final ($N_{esperado}$).

Assim, a frequência de acidentes esperada final ($N_{esperado}$) será um valor intermediário entre o número de acidentes observados e o número de acidentes esperados previsto pelo MPA, evitando valores extremos e que venham a divergir consideravelmente para uma entidade. O método Empírico de Bayes é amplamente citado na literatura e é recomendado pelo HSM (Persaud e Lyon, 2007; Victoria Gitelman e Etti Doveh, 2016; Elvik *et al.*, 2017). No entanto, a utilização do método Empírico de Bayes exige a disponibilidade de um conjunto amplo e

confiável de dados de acidentes observados, dos quais o método depende inteiramente da disponibilidade.

- Diferentes Perspectivas do estudo da segurança viária

O MPA, como um modelo estatístico de regressão representado por uma função do tipo da Equação 2, tem no lado esquerdo da equação a variável que prevê o número médio de acidentes esperados (variável dependente) e no direito as variáveis que representam as características do elemento rodoviário analisado (variáveis independentes). Estes dois lados apresentam duas diferentes perspectivas da análise da segurança viária (Hauer, 2015). Enquanto o lado da esquerda permite descobrir quantos acidentes são esperados para acontecer em uma rodovia com certas características, o lado direito traz o questionamento sobre qual pode ser o benefício de segurança de uma rodovia se for alterada uma das suas características. Em resumo, o lado da esquerda tem uma perspectiva de aplicação prática do estudo da segurança viária, já o lado direito da equação tem uma perspectiva mais associada à pesquisa sobre o tema.

$$N_{previsto} = \beta_0 \times L^{\beta_1} \times VDMA^{\beta_2} \quad (2)$$

Onde:

$N_{previsto}$: Frequência média de acidentes esperados para o segmento;

L_i : Comprimento do segmento;

VDMA: Volume diário Médio Anual; e

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: Parâmetros de ajuste do modelo.

No entanto é necessário cautela ao se analisar o lado direito da equação, para não admitir uma relação causa-efeito. Não necessariamente uma correlação entre as variáveis analisadas e o número de acidentes indica que ao se alterar o valor de uma variável do lado direito da equação, o valor do número de acidentes esperado será alterado proporcionalmente (Hauer, 2010; Elvik, 2011). Segundo Hauer (2015), isso se deve a dois fatores, são eles (i) o viés de uso (*bias in use*) e (ii) o viés do ajuste (*bias in fit*). O viés de uso diz respeito às variáveis utilizadas no modelo. Reflete se as variáveis realmente têm relação com o número de acidentes esperado ou se estão ali como substitutas de outra variável que pode ou não estar presente no modelo. O viés de ajuste, por sua vez, tem relação com a qualidade estatística do modelo: se aquele tipo de modelo e os seus parâmetros são os mais adequados para representar a tendência dos dados.

Visando a utilização do MPA para fins práticos, para que sejam disponibilizados modelos que representem adequadamente as rodovias brasileiras, sem a pretensão de descrever uma relação de causa-efeito em si, este trabalho utiliza a perspectiva do lado esquerdo da equação, sobre o qual não há controvérsias (Hauer, 2015). Portanto, o objetivo desta dissertação se concentra em obter um modelo de regressão que apresente boas estimativas da frequência média de acidentes esperada.

Entre as aplicações que a perspectiva da prática que um MPA possibilita está a realização de estudos antes e depois, como o estudo de Elvik *et al.* (2017), que avaliou os efeitos da duplicação de uma rodovia na segurança viária. Encontrou-se que a duplicação de um trecho rodoviário de 63 quilômetros reduziu o número de acidentes com feridos ou mortos, entre os anos de 2009 a 2015, em 75%. Entre outros muitos tipos de estudo viabilizados pelo uso de MPAs está a classificação da segurança da rede viária (*Network Screening*). Como o estudo realizado por Qin *et al.* (2016), onde as rodovias do estado da Dakota do Sul foram classificadas de acordo com a sua proporção de número de acidentes observado para o segmento dividido pelo número de acidentes previsto para o mesmo, conforme exposto pelo mapa da Figura 2.

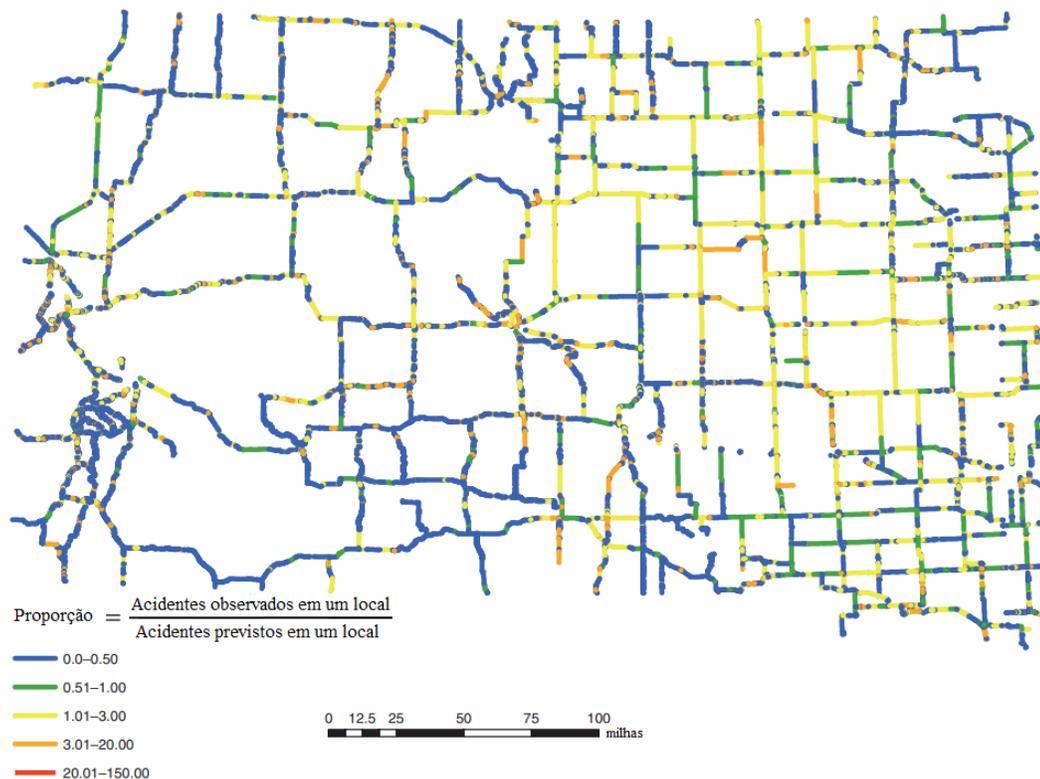


Figura 2: Classificação da segurança da rede viária do estado de Dakota do Sul
Fonte: Adaptado de Qin *et al.* (2016)

Desse modo é possível identificar os locais onde foram observados menos acidentes que o previsto pelo MPA (segmentos em azul e verde) e os locais onde foram observados mais acidentes que o previsto (amarelo, laranja e vermelho). Essa análise permite determinar os trechos rodoviários que devem receber maior atenção (primeiramente em vermelho), direcionando assim as ações em segurança viária.

2.1. MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES DO HSM

O HSM é um manual de Segurança Viária desenvolvido nos Estados Unidos para orientar os seus profissionais de transportes. De acordo com o próprio HSM, ele é um “*recurso que fornece conhecimento e ferramentas de segurança de uma forma útil para facilitar a tomada de decisão aprimorada com base no desempenho de segurança*” (AASHTO, 2010). Para isso, o manual fornece informações quantitativas para a tomada de decisões, reunindo informações e metodologias para medir, estimar e avaliar rodovias em termos de frequência de acidentes (número de acidentes por ano) e severidade dos acidentes (nível de lesões devido a acidentes).

O HSM é composto por 4 partes: (i) parte A – Introdução, Fatores Humanos e Fundamentos; (ii) parte B - Procedimento de Gestão da Segurança Viária; (iii) parte C – Métodos Preditivos e (iv) parte D – Fatores Modificadores de Acidentes. A parte C do HSM, Métodos Preditivos, apresenta um guia para a obtenção de um MPA para estimar a frequência média de acidentes esperados (N_{previsto}) para cada tipo de elemento viário. A primeira versão do HSM, publicada em 2010 (AASHTO, 2010) possui MPAs para segmentos e interseções de três tipos de instalações: (i) rodovias de pista simples, (ii) rodovias de múltiplas faixas e (iii) vias arteriais urbanas. Em 2014 foi disponibilizado um Anexo ao HSM, apresentando MPAs para *Freeways* e seus elementos, como rampas de acesso (AASHTO, 2014).

Cada um dos modelos disponibilizados no HSM calcula o N_{previsto} para um tipo de elemento, como uma interseção em via urbana ou um segmento rodoviário de pista simples, durante o qual as características geométricas e de operação não se alteram, e os volumes de tráfego são conhecidos ou previstos. N_{previsto} é calculado de acordo com a Equação 3 e ainda pode ser separado por severidade e por tipo de acidente.

$$N_{\text{previsto}} = N_{\text{SPF}} \times \prod_{n=1}^{12} \text{CMF}_n \times C_r \quad (3)$$

Onde:

N_{previsto} : A Frequência Média de Acidentes Esperada prevista para um segmento rodoviário individual para um ano específico;

N_{SPF} : Frequência de acidentes esperada para as condições do elemento base para um ano específico;

CMF: Fatores Modificadores de Acidentes (CMFs - *Crash Modification Factors*) ajustam as diferenças entre o elemento base e o analisado (Descrito na seção 3.2.2);

Cr: Fator de calibração.

2.1.1. Transferência dos Modelos do HSM

Os MPAs do HSM foram desenvolvidos para as vias, usuários e ambiente dos Estados Unidos para períodos anteriores ao ano de 2010. Para que esses modelos sejam adequadamente utilizados fora deste contexto, eles necessitam ser transferidos através de um processo de calibração que leve em conta as diferenças entre jurisdições em fatores como clima, comportamento dos condutores, população de animais e as diferenças e limites dos procedimentos do registro de acidentes. O processo de calibração dos modelos disponibilizados é descrito no Anexo A da parte C do HSM, a partir do uso de um fator de calibração (Cr). Cabe destacar que mais de um único fator de calibração pode ser utilizado, ou até mesmo uma função de calibração pode ser adotada.

- **Fator de Calibração**

Um fator de calibração (Cr) pode ser multiplicado ao modelo original com o objetivo de igualar o número de acidentes observado e previsto. Esse Cr expressa a razão da frequência de acidentes observados total ($N_{\text{observado}}$) para um conjunto selecionado de locais em relação à frequência média de acidentes total prevista (N_{previsto}) para os mesmos locais, durante o mesmo período de tempo. O Cr, multiplicado na Equação 3, é calculado conforme a Equação 4.

$$Cr = \frac{\sum_{\text{Todos os segmentos}} N_{\text{observado}}}{\sum_{\text{Todos os segmentos}} N_{\text{previsto}}} \quad (4)$$

Desse modo, espera-se que quando a soma das frequências médias observadas e previstas forem iguais, o valor de Cr será igual a 1,00. Quando o valor de Cr divergir muito de 1,00, fica evidente a diferença entre o número de acidentes previstos e observados. Por meio da Tabela 1 é

possível verificar alguns dos fatores de calibração calculados para segmentos de rodovias rurais de pista simples no Brasil. O manual do HSM recomenda que esse fator seja verificado a cada dois ou três anos com dados recentes ou com os dados dos anos para o qual se deseja realizar alguma análise específica, como por exemplo, em um estudo antes e depois.

Tabela 1: Fatores de calibração para rodovias rurais no Brasil

<i>Autor</i>	<i>Estado</i>	<i>Fator de Calibração (Cr)</i>	<i>Período dos Acidentes</i>
	SP	3,67	2008-2010
Silva (2017)	MG	2,60	2011-2015
	PR	3,77	2006-2012
Thomazi (2018)	SC	2,03	2011-2014
	GO	1,58	2011-2013
Waihrich (2016)	MG	2,37	2011-2013

Em relação aos dados necessários para a calibração, o HSM recomenda uma amostra mínima de 30 a 50 locais, que representem adequadamente as condições físicas e de segurança do elemento analisado. A amostra de locais não deve ser escolhida a partir do seu número de acidentes, ou seja, os locais analisados não devem ser intencionalmente escolhidos pelo seu valor elevado de acidentes. Assim que os locais para a calibração forem definidos, o próximo passo é a reunião dos dados necessários, se já não estiverem disponíveis. Para o banco de dados, cada local deve possuir informações de acidentes observados em um ano ou mais e os dados das características da rede viária necessárias para aplicar o MPA, conforme descrito no apêndice da parte C do HSM (AASHTO, 2010).

- **Múltiplos fatores de calibração**

Jurisdições muito grandes ou com diferentes características entre locais, como por exemplo regiões com relevo muito diverso, podem necessitar de diferentes fatores de calibração. Assim, uma jurisdição que não é relativamente uniforme em relação ao terreno, clima ou outra variável pode escolher ter mais de um Cr. Exemplos disso são relatados por Silva (2017) que utilizou um Cr para segmentos com curvas e outro para segmentos em tangente, enquanto Matarage e Dissanayake (2020) calibraram modelos separadamente para dois tipos de severidade e dois tipos de acidentes, resultando em quatro fatores de calibração diferentes.

Após resultados insatisfatórios da transferibilidade por meio de um único Cr, Srinivasan *et al.* (2016) investigaram a divisão das variáveis do MPA em faixas de valores e a aplicação de

diferentes fatores de calibração para cada uma delas. Um fator de calibração diferente foi usado para três diferentes faixas de Comprimento do Segmento rodoviário e também três diferentes faixas de valores de Volume de Tráfego para melhorar a transferência do modelo do HSM.

- **Função de calibração**

Além de fatores de calibração, também é possível ajustar a frequência de acidentes prevista pelo HSM aos dados de acidentes observados da jurisdição de interesse a partir de uma função paramétrica mais complexa. Srinivasan *et al.* (2016), diante de resultados insatisfatórios envolvendo o uso de fatores de calibração, e visando aperfeiçoar a transferência do modelo do HSM para rodovias de pista simples do estado do Arizona, apresentaram a função de calibração descrita na Equação 5.

$$N_{\text{previsto}} = a \times (\text{HSM}_{\text{previsto}})^b \quad (5)$$

Onde:

N_{previsto} : passa a ser o valor ajustado da Frequência de Acidentes Média Esperada previsto para um segmento individual para um ano específico;

$\text{HSM}_{\text{previsto}}$: é a Frequência de Acidentes Média Esperada prevista pelo modelo do HSM para um segmento individual para um ano específico; e

a , b : são parâmetros de ajuste para a calibração do modelo.

Nota-se que se o valor de b for igual a 1, o parâmetro a se transformará no fator de calibração simples. Porém esse modelo pode obter formas mais complexas, envolvendo mais do que dois parâmetros, não sendo estes aplicados ao resultado final da frequência de acidentes média esperada prevista pelo modelo do HSM, mas aos diferentes componentes da Equação 5. Ao comparar a transferência para diferentes estados norte-americanos, o estudo de Farid *et al.* (2018b) encontrou que, em todos os casos, a função de calibração apresentou resultados superiores ao fator de calibração. Já o trabalho de Claros *et al.* (2018), todavia, mostra que as funções de calibração não apresentaram melhora significativa na precisão em comparação ao uso de múltiplos fatores de calibração.

2.2. DESENVOLVIMENTO DE UM MPA

O HSM recomenda que seus usuários desenvolvam seus próprios MPAs com dados de sua própria jurisdição em vez de calibrar os modelos disponíveis na Parte C do manual. Isso se deve ao fato de que mesmo que a calibração dos MPAs da Parte C forneça resultados

satisfatórios, os MPAs desenvolvidos diretamente com dados de uma jurisdição específica podem fornecer estimativas mais confiáveis para essa jurisdição (AASHTO, 2010). Assim, vários estados norte-americanos e outros países utilizam modelos próprios, em vez daqueles disponíveis no HSM.

Diversos artigos comprovam a recomendação do HSM, pois os MPAs locais geralmente produziram modelos melhores do que os calibrados (Mehta e Lou, 2013; Lu *et al.*, 2014; Claros *et al.* 2018). No geral, essas descobertas sugerem ainda que MPAs regionalizados devem ser considerados em relação aos estaduais para estados que cobrem grandes áreas geográficas nas quais as práticas de registros de acidentes, clima, população de motoristas ou práticas e políticas de segurança possam variar. Li *et al.* (2017) desenvolveram diferentes modelos para cada condado do estado da Pensilvânia e estes foram capazes de descrever com mais precisão o desempenho de segurança em todo o estado, especialmente quando comparados à calibração simples dos MPAs fornecidos no HSM. Os autores encorajam que os modelos sejam tanto mais regionalizados quanto a disponibilidade de dados permitir.

Além dos modelos desenvolvidos localmente apresentarem melhores resultados, em geral, eles ainda possuem uma vantagem muito significativa para o contexto brasileiro e que pode ser aproveitada: podem ser utilizados com uma quantidade menor de variáveis. Ao testar o fator de calibração único, diferentes funções de calibração e desenvolver MPAs para *Freeways* do estado do Missouri, Claros *et al.* (2018) encontraram que os modelos desenvolvidos localmente apresentaram resultados similares ao do modelo do HSM, ainda que sem a mesma necessária extensa coleta de dados que este requer.

Dessa forma, percebe-se que o desenvolvimento de um MPA não é uma tarefa simples e direta. Existem muitas opções de caminhos e decisões a serem tomadas durante esse processo, que não possuem orientação única. Isso explica a diversidade de abordagens, técnicas e tipos de modelo existentes (Hauer, 2015). O tipo, a abordagem e qualidade do MPA depende de vários fatores determinantes que interferem em todo o processo: a qualidade e quantidade de dados disponíveis para a jurisdição analisada, o tipo de segmentação da rede viária, a definição das variáveis explicativas, o tipo de função a ser adotada e os seus parâmetros.

2.3. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Apesar da versão de 2010 do HSM fornecer MPAs para diferentes tipos de elementos viários e também um guia detalhado para a calibração desses MPAs, a experiência de diversos autores mostra que a transferência deles não é um caminho simples e direto. Ainda que os modelos do HSM sejam baseados na condição média da segurança das rodovias dos Estados Unidos, não há uma conclusão final sobre a sua transferibilidade para todos os seus estados ou para outros países. A calibração pelo método preditivo do HSM continua sendo amplamente realizada na literatura, sendo geralmente a primeira abordagem para a obtenção de um MPA. Antes de adotar um método de transferência mais complexo, como por exemplo: a função de calibração, geralmente se realiza a calibração orientada pelo HSM para que o fator de calibração e as medidas de ajuste sejam analisados (essa etapa é melhor discutida na Seção 3.2.4) (Claros *et al.* (2018); Li *et al.* (2017)).

Com o objetivo de melhorar a transferibilidade de um MPA, diferentes abordagens podem ser utilizadas além daquela apresentada no Anexo A da parte C do HSM. Múltiplos fatores de calibração podem ser utilizados, de modo a diferenciar o efeito de alguma variável no modelo. Uma outra abordagem utilizada é a função de calibração, que, por meio da utilização de funções e parâmetros adicionados ao modelo original, busca-se aperfeiçoar a transferibilidade do modelo. O MPA a ser transferido pode ser o do MPA do HSM, o da jurisdição mais próxima, ou também o de uma região com características parecidas.

Srinivasan *et al.* (2013) e Kweon *et al.* (2014) buscaram fornecer um passo a passo para determinar se o caminho apropriado para uma jurisdição é transferir o modelo HSM ou desenvolver modelos específicos para a jurisdição. Ambos os trabalhos recomendam que primeiramente seja realizada a calibração do modelo do HSM e que então se avalie a qualidade dos seus resultados. Uma vez que o modelo não apresenta uma transferibilidade satisfatória, torna-se necessário desenvolver um novo modelo. Vários artigos constataram que o melhor modelo é aquele desenvolvido localmente, a partir dos dados da própria jurisdição. Entretanto, esta etapa pode envolver extensivos esforços de coleta de dados e de manuseio estatístico, e em casos onde os modelos calibrados podem apresentar uma boa transferibilidade, o processo de desenvolvimento pode ser evitado (Intini *et al.*, 2019).

A Figura 3 apresenta um fluxograma que pode ser utilizado para orientar o processo de obtenção de um MPA para a jurisdição de interesse.

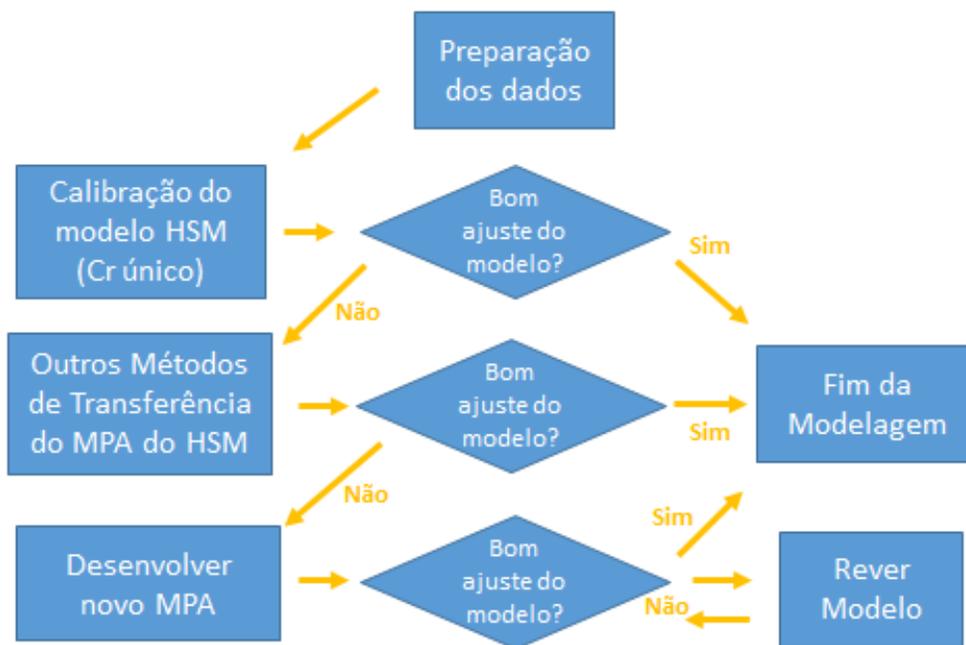


Figura 3: Diagrama do processo decisório para a elaboração de um MPA
Fonte: Do autor

Neste fluxograma, inicia-se com a preparação dos dados existentes para serem usados na calibração do modelo do HSM. A primeira decisão a ser tomada diz respeito à verificação do ajuste do modelo calibrado. Caso a calibração do modelo do HSM com os dados locais gere um bom ajuste, tem-se um bom modelo e os esforços de modelagem se encerram. Caso negativo, diferentes métodos podem ser utilizados para melhorar o seu desempenho. Havendo uma melhora no ajuste do modelo, o processo de modelagem pode ser encerrado, caso contrário, um novo MPA deve ser desenvolvido e testado até que seja encontrado um bom ajuste do modelo aos dados da jurisdição.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentados os Procedimentos Metodológicos utilizados na realização da dissertação. Primeiramente é delimitado o Cenário de Estudo e então são apresentadas as Etapas do Método de Trabalho.

3.1. CENÁRIO DE ESTUDO

A presente dissertação apresenta como cenário de estudo para a obtenção de MPAs os segmentos de rodovias rurais de pista simples da malha rodoviária federal existente no estado do Rio Grande do Sul. Os modelos foram estimados com dados de rodovias que possuem Volume de Tráfego compatíveis com este elemento rodoviário. De acordo com o HSM, deve-se considerar rodovias com VDMA de até 17800 veículos por dia. O cenário de estudo também se limita à condição da segurança viária existente entre os anos de 2017 e 2019, utilizando dados de acidentes e de tráfego exclusivamente referentes a estes.

3.2. ETAPAS DO MÉTODO DE TRABALHO

O procedimento metodológico adotado está organizado em quatro macro-etapas: (i) Consolidação e Organização da Base de Dados, (ii) Transferência do MPA do HSM, (iii) Desenvolvimento de MPAs específicos para o cenário estudado e (iv) Comparação dos resultados. A organização do fluxo de trabalho para as etapas do método de trabalho pode ser observada na Figura 4.

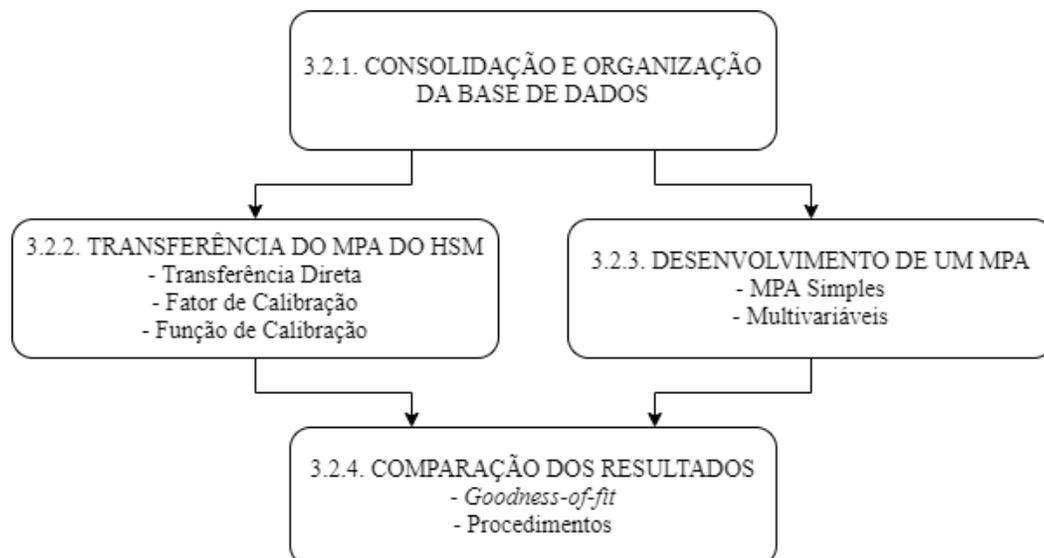


Figura 4: A organização do fluxo de trabalho para as etapas do método de trabalho

3.2.1. Consolidação e Organização da Base de Dados

Para a obtenção de um MPA que reflita a condição de segurança de um elemento rodoviário, um extenso banco de dados é necessário. Tanto a transferência do modelo do HSM, quanto o desenvolvimento de um novo modelo requerem três tipos de dados: (i) dados de acidentes, (ii) dados de tráfego e (iii) dados da geometria do elemento a ser analisado. Depois de determinar o tipo de instalação que se deseja modelar, no caso desta dissertação, segmentos de rodovias rurais de pista simples, ocorre a coleta e organização de dados. Muitas rodovias localizadas na proximidade de centros urbanos podem apresentar características de via urbana, sendo difícil determinar o que é uma rodovia rural ou não (AASHTO, 2010). Diante disso, este trabalho escolheu por definir que uma rodovia que contorna uma área urbana, sem cruzar por ela, deve ser considerada uma rodovia rural.

Para a calibração do MPA do HSM para segmentos de rodovias rurais de pista simples, é necessário um amplo conjunto de dados detalhados no Anexo A da Parte C do HSM e resumido na Tabela 2. Os dados podem ser classificados de dois modos: aqueles que são obrigatórios e aqueles que são desejáveis (podem ser substituídos pela adoção de uma informação padrão, caso não disponíveis).

Esta etapa, por envolver um esforço significativo de coleta e consolidação de dados, acaba por desmotivar a transferência e o desenvolvimento de MPAs, resultando na sua não utilização. A amostragem para a calibração, recomendado pelo HSM, é de pelo menos 30 a 50 elementos (segmentos ou interseções), com pelo menos 100 acidentes de trânsito ao todo. Entretanto, os autores Srinivasan *et al.* (2016) e Alluri *et al.* (2016) encontraram que não é estatisticamente comprovada essa amostra mínima, podendo variar de acordo com o objetivo do estudo.

O desenvolvimento de um modelo local pode apresentar resultados similares ao da transferência do MPA do HSM, mesmo sem uma coleta de dados tão extensa e sem a necessidade do processamento dos Fatores Modificadores de Acidentes (Claros *et al.*, 2018). O estudo de Ambros e Sedoník (2016) relatou que modelos simples, que apresentam somente dados de volume de tráfego, podem ser tão preditivos quanto os modelos multivariados. A coleta de dados para o desenvolvimento de um novo modelo pode ser orientada pelos dados presentes na Tabela

2. Além destes, outros dados de possíveis variáveis de interesse podem ser coletados ou obtidos em outra base disponível.

Tabela 2: Dados necessários para calibrar o MPA do HSM para segmentos de rodovias rurais de pista simples

Fonte: AASHTO (2010)

Elemento de dados	Dado Necessário		Suposição Padrão
	Obrigatório	Desejável	
Comprimento do segmento	X		Necessita dados reais
Volume diário médio anual	X		Necessita dados reais
Comprimento de curva horizontal e tangente	X		Necessita dados reais
Raio das curvas horizontais	X		Necessita dados reais
Presença de curva de transição		X	Padrão base da agência
Diferença para superelevação de projeto		X	Sem diferença do projeto
Porcentagem de greide		X	Padrão base no terreno
Largura da Faixa	X		Necessita dados reais
Tipo de acostamento	X		Necessita dados reais
Largura do acostamento	X		Necessita dados reais
Presença de iluminação		X	Assume-se sem iluminação
Densidade de acessos		X	Assume-se 3 acessos/km
Presença de faixa de ultrapassagem		X	Assume-se não presente
Presença de segmento com 4 faixas		X	Assume-se não presente
Presença de faixa de conversão à esquerda	X		Necessita dados reais
Presença de guia sonora central		X	Padrão base da agência
Design lateral da Rodovia (RHR)		X	Assume-se RHR = 3
Uso de fiscalização eletrônica de velocidade		X	Padrão na prática atual

A disponibilidade de dados pode ser o maior limitador para a modelagem da segurança de uma via. Além de os dados de tráfego, de acidentes e de características geométricas serem de difícil obtenção, a sua baixa qualidade, principalmente para o contexto de países em desenvolvimento, pode vir a gerar modelos com menor precisão (Gomes *et al.*, 2019).

- **Dados de Acidentes**

O HSM orienta que sejam utilizados pelo menos 100 acidentes de trânsito ao todo para o processo de calibração. Quando considerado o desenvolvimento de um novo MPA, Srinivasan *et al.*, (2013) orientam a utilização de um número mínimo anual de 300 acidentes. Diferentes estudos utilizaram uma base de dados de três anos (Heydari *et al.*, 2014; Troyer *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2015), sendo este também o período recomendado pelo HSM. Cinco anos de dados de acidentes pareceu ser a escolha mais adequada, segundo Ambros e Sedoník (2016), sendo que mais do que isso não é recomendável, podendo haver mudanças significativas nos locais estudados durante este período, podendo alterar o desempenho da segurança destes locais.

- **Dados de Tráfego**

O Volume de Tráfego é a variável mais crítica na previsão de acidentes (Alluri *et al.*, 2016). Como tal, o manual do HSM requer como dado essencial para seus modelos o valor do Volume de Tráfego (VDMA – Volume Diário Médio Anual, expresso em veículos por dia) para cada segmento. Outros tipos de dados de tráfego também podem ser obtidos para um segmento rodoviário, como por exemplo: a velocidade de operação e a porcentagem de veículos pesados na composição de tráfego.

Caso um segmento não possua o dado de volume de tráfego, ele deve ser desconsiderado. Caso um segmento só possua dados para apenas um ano, ele pode ser aplicável a todos os anos da análise. Caso falte o volume de tráfego para um ano da série em análise, o seu valor pode ser interpolado. Segmentos com valores de volume de tráfego extremamente altos ou baixos devem ser considerados como *outliers* e excluídos da análise. É importante considerar que o MPA para segmentos de rodovias rurais de pista simples do HSM somente é aplicável para volumes de tráfego entre 0 e 17800 veículos por dia. Segmentos com valores de volume de tráfego fora desta faixa de valores podem não apresentar estimativas confiáveis (AASHTO, 2010).

- **Dados Geométricos**

Os dados geométricos presentes na Tabela 2 podem ser obtidos de diferentes maneiras. Geralmente, os estudos nos Estados Unidos e em outros países desenvolvidos obtêm essas informações em agências governamentais e de transportes (Mehta e Lou, 2013; Srinivasan *et al.*, 2016; Moraldi *et al.*, 2019). Diversas informações da Tabela 2 também podem ser obtidas por

meio de ferramentas de imagens de satélite (Matarage e Dissanayake, 2019; Shin *et al.*, 2015; Brimley *et al.*, 2012). Outra fonte comum de dados acerca da geometria da via é a coleta direta, como no estudo de Rusli *et al.* (2018), onde foi realizada uma extensa coleta de dados em campo, representando o contexto de países em desenvolvimento, ou os estudos de Dhahir e Hassan (2019) e Rusli *et al.* (2018), que coletaram diversas informações adicionais sobre o clima e a condição do pavimento para prever como essas variáveis influenciam na frequência de acidentes.

- **Segmentação**

Uma vez que todos os dados de acidentes, de tráfego e geométricos estejam coletados, eles devem ser atribuídos ao segmento rodoviário a que pertencem. Em segurança viária, esta etapa de organização das informações da rede viária em segmentos independentes é denominada segmentação. No desenvolvimento de um MPA, a segmentação é a primeira grande etapa a ser considerada, sendo de fundamental importância (Ghadi e Török, 2019).

Segundo a AASHTO (2010), um segmento rodoviário de pista simples é uma seção de via contínua, que fornece operação bidirecional de tráfego, não é interrompida por uma interseção, e possui características geométricas e de controle de tráfego homogêneas. Há diferentes modos de segmentar os trechos rodoviários em segurança viária, o recomendado pelo HSM e mais usado na estimação de MPA chama-se segmentação homogênea. Esse método procura fazer a divisão de modo que cada segmento tenha características constantes. Cada vez que uma das variáveis explicativas mudar, por exemplo a largura da faixa ou o tipo de relevo, gera-se um novo segmento.

Além da divisão em segmentos homogêneos, pode ser adotada a segmentação por comprimentos uniformes, VDMA's constantes, duas curvas e duas tangentes, entre outras. Além dos diversos métodos citados na literatura, a segmentação também pode ser utilizada de acordo com os dados já disponíveis, por exemplo um banco de dados gerados para outros propósitos (Ambros *et al.*, 2018).

Para o caso de modelos com muitas variáveis, como o do HSM que possui um total de oito variáveis obrigatórias e dez desejáveis, ao adotar-se a segmentação homogênea, como o presente estudo, é natural que surjam muitos segmentos curtos. Isso pode dificultar a atribuição precisa de acidentes a segmentos individuais e também gerar um grande número de segmentos sem nenhum acidente registrado (Ambros *et al.*, 2018). Por esse motivo, é comum adotar um

limite mínimo de comprimento para os segmentos, ainda que a agregação de segmentos venha a gerar uma perda de dados, visto que somente uma informação pode definir determinada característica do segmento. O HSM recomenda um comprimento mínimo de 0,1 milha (cerca de 160 m), o que foi seguido pelos estudos de Qin *et al.*, (2016), Asal e Said, 2019 e Gaweesh e Ahmed, (2019), por exemplo. Já o estudo de Ambros *et al.* (2016) utiliza um comprimento mínimo de 50m. O estudo desenvolvido por Silva (2017), baseado no sistema métrico, estabeleceu um comprimento mínimo de 100 metros para cada segmento.

- **Organização do Banco de dados**

Uma vez que todos os dados foram coletados e a segmentação concluída, uma planilha pode ser utilizada para a organização final dos dados. Cada segmento ocupa uma linha da planilha, enquanto cada uma das variáveis coletadas é armazenada nas suas respectivas colunas. Um exemplo dessa configuração pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3: Exemplo de organização do banco de dados em uma planilha

Fonte: Do autor

Segmento	Comprimento (m)	VDMA (veículos por dia)			Nº de Acidentes total		
		Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 1	Ano 2	Ano 3
1	1050	1799	1889	1983	0	5	4
2	8738	1554	1538	1523	13	2	6
3	916	2430	2435	2420	2	0	4
4	250	5488	5488	5488	1	0	1
5	2784	2467	2467	2467	2	4	0
...

A etapa de Consolidação e Organização da base de dados pode vir a ser muito desgastante e consumir muito tempo, dependendo da quantidade e qualidade dos dados disponíveis previamente (Srnivasan *et al.*, 2013). Quanto maior, de melhor qualidade e mais bem organizada a base de dados, melhor será a previsão dos modelos. Terminada esta etapa, é possível seguir para as etapas seguintes, onde os MPAs são efetivamente trabalhados.

3.2.2. Transferência do Modelo do HSM

O capítulo 10 do HSM apresenta um método estruturado para estimar a frequência média de acidentes esperada ($N_{previsto}$) para rodovias rurais de pista simples por meio de MPAs, designado pelo mesmo como SPFs (*Safety Performance Functions*). O resultado dos modelos é expresso para o período de um ano, seja para segmentos ou para interseções com características

geométricas e de controle de tráfego conhecidas e que não se alteraram (AASHTO, 2010). Esta seção do trabalho seguiu o método descrito neste capítulo para a obtenção de N_{previsto} para os segmentos de rodovias de pista simples padrão do HSM, calculado pela Equação 6 a seguir:

$$N_{\text{SPF}} = \text{VDMA} \times L \times 365 \times 10^{\alpha} \times e^{\beta} \quad (6)$$

Onde:

N_{SPF} : A Frequência média de acidentes esperada prevista para as condições base de um segmento rodoviário individual para um ano específico;

VDMA: Volume diário médio anual (veículos por dia);

L: Comprimento do segmento rodoviário (km); e

α , β : Parâmetros para ajuste do modelo.

N_{SPF} é a frequência média de acidentes esperada para as condições do segmento rodoviário de pista simples base definido pelo HSM, para um ano específico, para um local específico. Para obter a estimativa do N_{previsto} para qualquer tipo de segmento rodoviário de pista simples, objetivo buscado por este trabalho, utiliza-se a Equação 3.

$$N_{\text{previsto}} = N_{\text{SPF}} \times \prod_{n=1}^{12} \text{CMF}_n \times \text{Cr} \quad (3)$$

Onde:

N_{previsto} : A Frequência média de acidentes esperada prevista para um segmento rodoviário individual para um ano específico;

N_{SPF} : A Frequência média de acidentes esperada prevista para as condições base de um segmento rodoviário individual para um ano específico;

CMF 1-12: Fatores Modificadores de Acidentes para ajustar o segmento em estudo às características do segmento base de rodovias rurais de pista simples do HSM; e

Cr: Fator de calibração para ajustar o N_{previsto} a frequência de acidentes observados em uma jurisdição em particular.

- **Severidade de acidentes e Tipos de acidente**

A Equação 3 estima o N_{previsto} para todos os tipos de severidades e tipos de acidentes. Baseado nas Tabelas 4 e 5 é possível determinar o valor de N_{previsto} da Equação 3 por nível de severidade de acidentes e por tipo de acidente, respectivamente. As Tabelas 4 e 5 foram construídas para o HSM a partir das características dos acidentes ocorridos nos Estados Unidos para este tipo de segmento rodoviário, podendo ser atualizadas para descrever os dados locais de acidentes de uma jurisdição baseados no apêndice da parte C do HSM.

Tabela 4: Distribuição padrão do total de acidentes por nível de severidade em segmentos de rodovias rurais de pista simples (AASHTO, 2010)

Severidade do Acidente	Porcentagem do Total de Acidentes em Segmentos Rodoviários
Fatal (K)	1,3%
Lesão incapacitante (A)	5,4%
Lesão não incapacitante (B)	10,9%
Possível lesão (C)	14,5%
Total de fatal mais Feridos (KABC)	32,1%
Somente danos materiais (PDO)	67,9%
Total (KABCO)	100,0%

Tabela 5: Distribuição padrão do total de acidentes por tipo de colisão para cada nível de severidade em segmentos de rodovias rurais de pista simples. (AASHTO, 2010)

Tipo de Colisão	Porcentagem do Total de Acidentes em Segmentos Rodoviários por nível de severidade		
	Feridos e Fatais	Danos Materiais	Total Combinado
Acidentes com um único veículo			
Colisão com animal	3,8%	18,4%	12,1%
Colisão com ciclista	0,4%	0,1%	0,2%
Colisão com pedestre	0,7%	0,1%	0,3%
Capotamento	3,7%	1,5%	2,5%
Saída de Pista	54,5%	50,5%	52,1%
Outros tipos	0,7%	2,9%	2,1%
Total (Um veículo)	63,8%	73,5%	69,3%
Acidentes com Múltiplos veículos			
Colisão Transversal	10,0%	7,2%	8,5%
Colisão Frontal	3,4%	0,3%	1,6%
Colisão Traseira	16,4%	12,2%	14,2%
Colisão Lateral	3,8%	3,8%	3,7%
Outros	2,6%	3,0%	2,7%
Total (múltiplos veículos)	36,2%	26,5%	30,7%
Total de acidentes	100,0%	100,0%	100,0%

- **Fatores Modificadores de Acidentes**

Os Fatores Modificadores de Acidentes (CMFs - *Crash Modification Factors*) são aplicados na Equação 3 com o objetivo de ajustar as diferenças entre as características geométricas do segmento base do HSM e as características de um segmento qualquer. A Tabela 6 apresenta as características do segmento rodoviário de pista simples base e a seguir é orientado o processo de obtenção de cada um dos doze CMFs. Observa-se que se o multiplicador dos doze CMFs a ser multiplicado à Equação 3 for maior do que 1, ele aumentará o valor de $N_{previsto}$, caso ele seja menor do que 1, ocorrerá o contrário. Caso o segmento analisado apresente as mesmas características que o segmento base para um determinado CMF, o seu valor será 1,00.

Tabela 6: Características do segmento base do HSM para rodovias rurais de pista simples.
Fonte: AASHTO (2010)

CMF	Descrição	Condição Base HSM
1	Largura da Faixa	3,6 m (12 pés)
2	Largura e Tipo de Acostamento	1,8 m (6 pés) - Pavimentado
3	Curva Horizontal	Nenhuma
4	Superelevação	Conforme Projeto
5	Greide	≤ 3%
6	Densidade de acessos	3 acessos por km (5/milha)
7	Guia Sonora Central	Nenhuma
8	Faixa de Ultrapassagem	Nenhuma
9	Faixa para Conversão à Esquerda	Nenhuma
10	Design lateral da Rodovia (RHR)	3
11	Iluminação	Nenhuma
12	Fiscalização Automática de Velocidade	Nenhuma

– Largura da Faixa – CMF 1

O CMF 1 é o fator modificador de acidentes relacionado à largura da faixa dos segmentos rodoviários, sendo calculado por meio da Equação 7:

$$CMF\ 1 = (CMF\ ra - 1,0) \times p\ ra + 1,0 \quad (7)$$

Onde:

CMF 1: Fator modificador de acidentes para o efeito da largura da faixa no total de acidentes registrados;

CMF ra: Fator modificador de acidentes para o efeito da largura da faixa nos acidentes relacionados, obtido de acordo com a Tabela 7; e

p ra: proporção do total de acidentes constituído por acidentes relacionados (saída de pista de veículo individual, colisão frontal de múltiplos veículos e colisão lateral de veículos). Essa proporção é estimada como 57,4 % do total de acidentes pelo HSM, podendo ser atualizada para cada jurisdição.

Tabela 7: CMF ra para largura da faixa em segmentos rodoviários
Fonte: AASHTO (2010)

Largura da faixa	Volume diário médio Anual (veículos por dia)		
	<400	400 a 2000	>2000
< 2,75 m	1,05	$1,05 + 2,81 \times 10^{-4} \times (VDMA - 400)$	1,50
3,05 m	1,02	$1,02 + 1,75 \times 10^{-4} \times (VDMA - 400)$	1,30
3,35 m	1,01	$1,01 + 2,5 \times 10^{-5} \times (VDMA - 400)$	1,05
> 3,66 m	1,00	1,00	1,00

– Largura e Tipo de Acostamento – CMF 2

O CMF 2 é o fator modificador de acidentes relacionado à largura e o tipo de Acostamento dos segmentos rodoviários e é calculado por meio da Equação 8:

$$CMF 2 = (CMF wra \times CMF tra - 1,0) \times pra + 1,0 \quad (8)$$

Onde:

CMF 2: Fator modificador de acidentes para o efeito da largura e tipo de acostamento no total de acidentes;

CMF wra: Fator modificador de acidentes para o efeito da largura da faixa nos acidentes relacionados, calculado de acordo com a Tabela 8;

CMF tra: Fator modificador de acidentes relacionado ao tipo de acostamento, obtido de acordo com a Tabela 9; e,

p ra: proporção do total de acidentes constituído por acidentes relacionados.

Tabela 8: CMF wra para largura do acostamento em segmentos rodoviários
Fonte: AASHTO (2010)

Largura do acostamento	Volume diário médio Anual (veículos por dia)		
	<400	400 a 2000	>2000
0,0 m	1,10	$1,10 + 2,5 \times 10^{-4} \times (VDMA - 400)$	1,50
0,6 m	1,07	$1,07 + 1,43 \times 10^{-4} \times (VDMA - 400)$	1,30
1,2 m	1,02	$1,02 + 8,125 \times 10^{-5} \times (VDMA - 400)$	1,15
1,8 m	1,00	1,00	1,00
2,4 m ou mais	0,98	$0,98 + 6,875 \times 10^{-5} \times (VDMA - 400)$	0,87

Tabela 9: CMF tra para largura e tipo de acostamento em segmentos rodoviários
Fonte: AASHTO (2010)

Tipo do acostamento	Largura do Acostamento (m)						
	0,0	0,30	0,60	0,90	1,20	1,80	>2,40
Pavimentado	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Brita	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02
Composto	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,06
Gramma	1,00	1,01	1,03	1,04	1,05	1,08	1,11

– Curva Horizontal – CMF 3

A condição base para o alinhamento é a tangente, para os casos onde há curvas horizontais foi desenvolvido o CMF 3. Ele pode ser calculado por meio da Equação 8:

$$CMF\ 3 = \frac{(0,963 \times Lc) + \left(\frac{24,4}{R}\right) - (0,012 \times S)}{(0,963 * Lc)} \quad (9)$$

Onde:

CMF 3: Fator modificador de acidentes para o efeito do alinhamento horizontal no total de acidentes;

Lc: Comprimento da curva horizontal (quilômetros), incluindo curva de transição, se presente;

R: Raio da curvatura (metros); e

S: 1 se curva com transição, 0 se curva simples e 0,5 se somente em um dos lados.

– Superelevação – CMF 4

O CMF 4 é aplicado caso a superelevação da curva analisada venha a divergir da superelevação em projeto. A condição base do HSM prevê uma diferença de 0%, de outro modo o CMF4 deve ser calculado por uma das Equações 10:

CMF 4 = 1,00, se diferença menor que 1%;

CMF 4 = 1,00 + 6 × (SV – 0,01), se SV for de 1 a 2%; e (10)

CMF 4 = 1,06 + 3 × (SV – 0,02), se SV for maior que 2%.

Onde:

CMF 4: Fator modificador de acidentes para o efeito da diferença da superelevação em projeto no total de acidentes; e

SV: Diferença na superelevação de projeto.

– Greide – CMF 5

A condição base do HSM prevê um terreno plano, o CMF 5 computa o efeito de rampas em segmentos rodoviários de pista simples. Ele pode ser obtido através da Tabela 10 a seguir:

Tabela 10: CMF 5 referente ao Tipo de Terreno
Fonte: AASHTO (2010)

Greide aproximado (%)		
Terreno plano (≤3%)	Terreno moderado (3%<greide≤6%)	Terreno íngreme (>6%)
1	1,1	1,16

– Densidade de acessos – CMF 6

A condição base do HSM é de 3 acessos por quilômetro (5 acessos por milha), caso houver menos acessos, o CMF 6 é considerado 1,00. Se o número de acessos por quilômetro for maior que 3, o CMF 6 deve ser calculado por meio da Equação 11:

$$CMF 6 = \frac{0,322 + (DA \div 1,609) \times [0,05 - 0,005 \times \ln(VDMA)]}{0,322 + 5 \times [0,05 - 0,005 \times \ln(VDMA)]} \quad (11)$$

Onde:

CMF 6: Fator modificador de acidentes para o efeito do número de acessos no total de acidentes;

VDMA: Volume diário médio anual da rodovia analisada (veículos por dia); e

DA: Densidade de acessos de ambos os lados da rodovia (acessos/quilômetro).

– Guia Sonora Central – CMF 7

A guia sonora central é instalada entre as faixas de fluxos opostos da rodovia. A condição base é a sua ausência, onde o CMF 7 é igual a 1,00. Porém, se ela estiver presente, o CMF 7 é igual a 0,94.

– Faixa de Ultrapassagem – CMF 8

A condição base é a ausência de faixa de ultrapassagem, onde CMF 8 é igual a 1,00. Onde uma faixa estiver presente, o CMF 8 é igual a 0,75, onde duas faixas estiverem presentes, seu valor é igual a 0,65. Esse CMF não se aplica a longos trechos de rodovias de pista dupla.

– Faixa para Conversão à Esquerda – CMF 9

A condição base deste fator é a ausência de faixa para conversão à esquerda, onde o CMF 9 é igual a 1,00. Caso o segmento apresente faixa para conversão à esquerda, o CMF 9 deve ser calculado conforme Equação 12:

$$CMF\ 9 = 1,0 - (0,7 \times p\ dwy \times \frac{p\ lt}{D}) \quad (12)$$

Onde:

CMF 9: Fator de modificador de acidentes para o efeito da faixa de conversão à esquerda;

$p\ dwy$: Porcentagem de acidentes relacionados aos acessos no segmento; e

$p\ lt/D$: Porcentagem do total de acidentes sujeitos à efeitos de conversão à esquerda, calculado pela Equação 13:

$$CMF\ 9 = \frac{(0,0047 \times DA) + (0,024 \times DA^2)}{1,199 + (0,0047 \times DA) + (0,0024 \times DA^2)} \quad (13)$$

Onde:

DA: Densidade de Acessos por ambos os lados da rodovia, em acessos por km, podendo ser adotado o valor base de 0,50.

– Design lateral da Rodovia – CMF 10

Este CMF mede o quando as condições na lateral da rodovia afetam o número de acidentes. A condição base é a de que o CMF 10 é igual a 1,00. Ele é calculado por meio da Equação 14:

$$CMF\ 10 = \frac{e^{(-0,6869+0,0668 \times RHR)}}{e^{(-0,4865)}} \quad (14)$$

Onde:

CMF 10: Fator modificador de acidentes para o efeito da avaliação do *Design* lateral da rodovia no total de acidentes; e

RHR: Avaliação do *Design* lateral da rodovia (*Road Hazard Rating*). A AASHTO define RHR como a largura da zona livre relacionado a velocidade, volume de tráfego e inclinação do talude. O sistema considera estas variáveis em conjunto com a inclinação e a irregularidade da

lateral da rodovia, a recuperabilidade dos condutores e outros fatores além da zona livre, como árvores e barreiras. Assim como o RHR aumenta de 1 até 7, aumenta também o risco de acidentes por frequência e/ou severidade.

– Iluminação – CMF 11

O CMF 11 leva em consideração a influência da iluminação no número de acidentes. A condição base é a de que não há iluminação e por isso o CMF 11 é igual a 1. Onde houver iluminação, o valor do CMF deve ser obtido por meio da Equação 15:

$$CMF\ 11 = 1,0 [1,0 - 0,72 \times p\ inr - 0,83 \times p\ pnr] \times p\ nr \quad (15)$$

Onde:

CMF 11r: fator de modificador de acidentes que leva em conta a influência da iluminação no total de acidentes;

p pnr: proporção do total de acidentes noturnos em segmentos não iluminados de acidentes com danos apenas materiais, conforme a Tabela 11, proposta pelo HSM;

p inr: proporção do total de acidentes noturnos em segmentos não iluminados de acidentes com mortos ou feridos, conforme a Tabela 11; e

p nr: proporção do total de acidentes em segmentos sem iluminação que ocorrem no período noturno, conforme a Tabela 11.

Tabela 11: Proporções de acidentes noturnos para segmentos rodoviários sem iluminação

Proporção do total de acidentes noturnos por nível de severidade		Proporção dos acidentes que ocorreram a noite
Fatal e Feridos (p inr)	Danos materiais (p pnr)	(p nr)
0,382	0,618	0,370

– Fiscalização Automática de Velocidade – CMF 12

É o CMF que avalia o efeito da fiscalização eletrônica para a detecção da velocidade dos condutores. A condição padrão é a sua ausência, onde CMF 12 é equivalente a 1,00. Se o dispositivo estiver presente, esse valor passa a ser 0,93.

• **Métodos para a Transferência do MPA**

Nessa seção são cobertos três métodos utilizados por Srinivasan *et al.* (2016) para a transferência de MPAs. Estes métodos foram posteriormente testados por Li *et al.* (2017) Claros *et al.* (2018), Farid *et al.* (2018), Intini *et al.* (2019) e Matarage e Dissanayake (2020). O primeiro

método considerado neste estudo é a transferência direta do modelo do HSM, onde não há nenhum método de calibração para lidar com as diferenças entre as condições da segurança rodoviária entre os Estados Unidos e o Brasil. Na prática, pode-se dizer que o Fator de Calibração (Cr) disponível na Equação 2 será considerado como igual a 1,00. O segundo método considerado utiliza um ou mais Fatores de Calibração para ajustar o modelo original à jurisdição de interesse. O terceiro método utiliza Funções de Calibração em vez de Fatores de Calibração.

– Fator de Calibração

O fator de calibração Cr, utilizado na Equação 3, é calculado a partir da relação entre a soma da frequência de acidentes observados para um conjunto de locais analisados dividido pela soma do Nprevisto para os mesmos locais durante um mesmo período de tempo, conforme a Equação 4, disponível no Anexo à parte do HSM.

$$Cr = \frac{\sum_{\text{Todos os segmentos}} N_{\text{observado}}}{\sum_{\text{Todos os segmentos}} N_{\text{previsto}}} \quad (4)$$

Onde:

Cr: Fator de Calibração para segmentos rodoviários de um tipo específico desenvolvido para uma jurisdição em particular ou área geográfica;

Nobservado: Total de acidentes registrados para o segmento durante o período de estudo; e

Nprevisto: Total de acidentes previstos pela Equação 3 para o segmento durante o período de estudo.

Desse modo, espera-se que quando a soma das frequências médias observadas e previstas forem iguais, o fator de calibração será igual a 1,00. Quando houver mais observados do que previstos, esse valor será maior do que 1,00. Quando o valor de acidentes previstos for menor do que o de observados, o coeficiente será menor que 1,00. O manual do HSM recomenda que esse fator seja verificado a cada dois ou três anos, com dados recentes ou dos anos para o qual se deseja analisar algum estudo antes e depois.

– Múltiplos Fatores de Calibração

Mais de um fator de calibração pode ser usado para obter um melhor desempenho do modelo. Para isto, em vez de um único Cr calculado pela Equação 4 ser aplicado a todos os segmentos analisados, diferentes fatores podem ser calculados para serem usados caso o segmento analisado se encaixe em uma determinada característica. Diferentes variáveis do

modelo do HSM podem ser divididas em faixas de valores ou categorias, conforme realizado por Srinivasan *et al.* (2016) e observado na Tabela 12.

Tabela 12: Fatores de calibração por faixa de valores de VDMA, faixa de comprimento de segmento, presença de curva horizontal e total
Fonte: Adaptado de Srinivasan *et al.* (2016)

Variável	Faixa ou Categoria	Acidentes		Fator de Calibração
		Observados	Previstos (HSM)	
Fator de Calibração por faixa de VDMA	0-2500	292	226,1	1,291
	2501-5000	262	258,4	1,014
	>5000	199	213,2	0,933
Fator de Calibração por faixa de comprimento do segmento (milhas)	0-0.4	337	239,4	1,408
	0.4-0.8	149	150,5	0,990
	0.8-1.2	267	307,9	0,867
Fator de Calibração por presença de curva horizontal	Sim	215	179,6	1,197
	Não	538	518,1	1,038
Todos os Locais	Todos	753	697,7	1,079

Três diferentes Fatores de Calibração foram calculados para três diferentes faixas de valores de Volume de Tráfego, isto é, se um segmento rodoviário possui um VDMA de 4000 veículos por dia, o seu Fator de Calibração será 1,014. Caso o VDMA fosse de 5000 veículos por dia, o Fator de Calibração seria de 0,933. Isto quer dizer que o MPA está aplicando Fatores menores para faixas de VDMA maiores. Para a determinação dos Múltiplos Fatores de Calibração optou-se pela função objetivo o método da Máxima Verossimilhança, conforme descrito a seguir, para a determinação dos parâmetros da função de calibração na Equação 5.

– Função de calibração

Além da utilização de fatores, funções de calibração podem ser utilizadas para aperfeiçoar a transferência de um MPA. As funções de calibração podem ser usadas para alterar o efeito que uma ou mais variáveis têm no modelo, alterando a sua forma funcional e assim otimizando o modelo (Claros *et al.*, 2018). Srinivasan *et al.* (2016) apresentaram a função de calibração (Equação 4) que com uma função paramétrica exponencial e apenas mais um parâmetro adicionado ao modelo do HSM é possível ajustar o valor previsto aos dados de acidentes observados da jurisdição de interesse.

$$N_{\text{previsto}} = a \times (\text{HSM}_{\text{previsto}})^b \quad (5)$$

Onde:

N previsto: passa a ser o valor ajustado da Frequência de Acidentes Média Previsto para um segmento individual para um ano específico;

HSM previsto: é a Frequência de Acidentes Média prevista pelo modelo do HSM para um segmento individual para um ano específico; e

a, b : são parâmetros de ajuste para a calibração do modelo.

Para a determinação dos parâmetros que compõem a Função de Calibração utiliza-se o método da Máxima Verossimilhança, por meio da Regressão Binomial Negativa. A partir de uma planilha no Excel, busca-se maximizar o resultado da soma do logaritmo da verossimilhança (LLnb), calculado conforme a Equação 16, para cada segmento, por meio da ferramenta *Solver* (Srinivasan *et al.*, 2016). Como mostrado na Figura 5, a célula que contém o valor da soma de LLnb para todos os segmentos deve ser selecionada como objetivo. Escolhida a opção de máximo, devem ser escolhidas as células que contém os parâmetros que devem ser alterados, incluindo o parâmetro da função objetivo φ . Adicionadas as restrições: $\sum N_{\text{observado}}$ igual a $\sum N_{\text{previsto}}$, parâmetros maiores que zero e algum outro aplicável, a ferramenta fará a estimativa dos parâmetros.

$$LL_{NB} = \sum_{i=0}^n [\ln \Gamma (k_i + \varphi L_i) - \ln \Gamma (\varphi L_i) + \varphi L_i \ln(\varphi L_i) + k_i \ln(\mu_i) - (\varphi L_i + X) \times \ln(\varphi L_i + \mu_i)] \quad (16)$$

Onde:

k_i, μ_i : Número de acidentes observados e previstos para cada segmento, respectivamente;

L_i : Comprimento do segmento em milhas; e

φ : Parâmetro de ajuste do modelo.

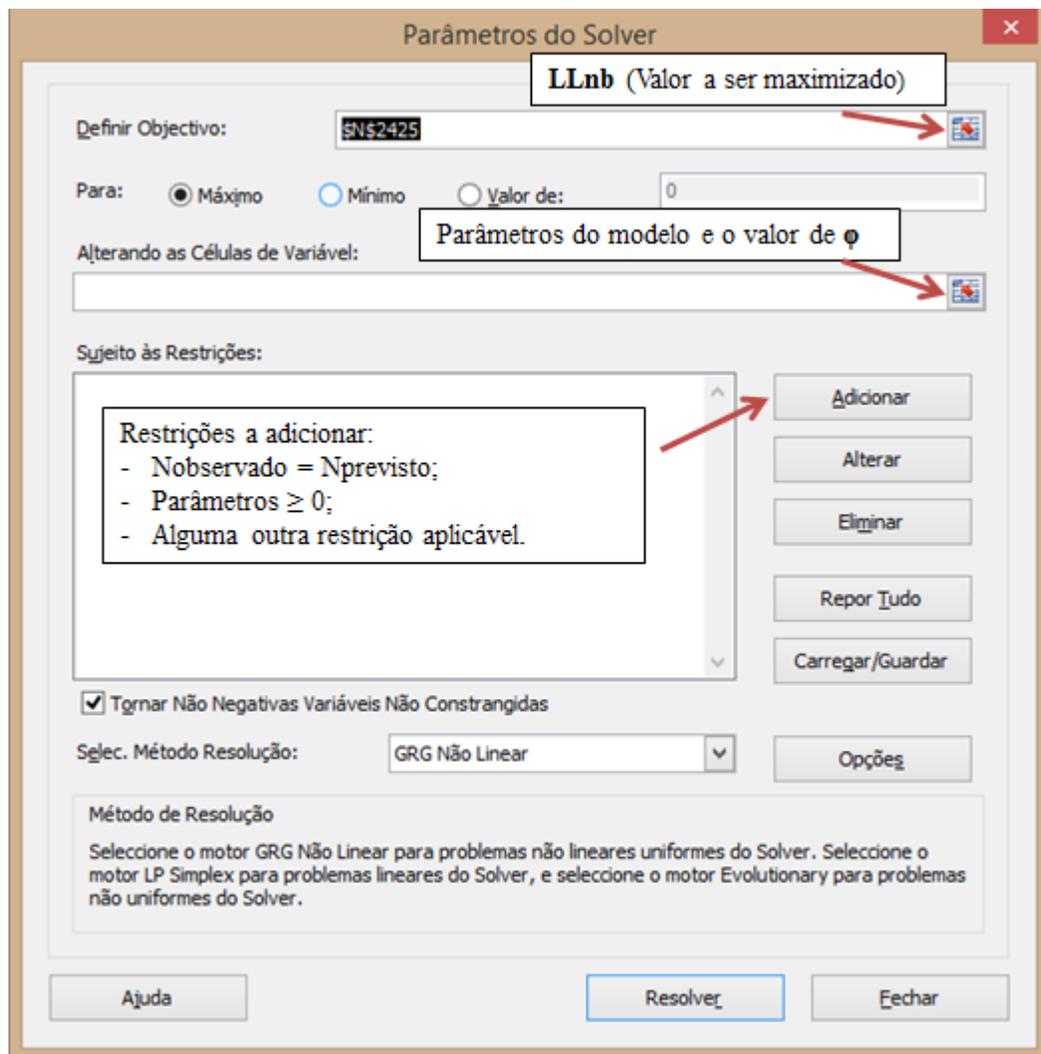


Figura 5: Aplicação da função objetivo na ferramenta Solver, do Excel
Fonte: Do autor

3.2.3. Desenvolvimento de um MPA

O desenvolvimento de um MPA não é uma tarefa simples e direta. Existem muitas opções de caminhos e decisões necessárias a serem tomadas durante esse processo, que não possuem orientação única. Isso explica a diversidade de abordagens, técnicas e tipos de modelo existentes. Uma vez que a etapa de Consolidação e Organização da Base de Dados estiver concluída, tendo todos os dados necessários de interesse coletados, a segmentação concluída e os dados dispostos conforme a Tabela 3, pode-se iniciar o processo de desenvolvimento de um novo MPA. A Figura 6 apresenta o “processo em espiral” do desenvolvimento de um MPA. Os dados são introduzidos no início da espiral, onde percorrem as diversas etapas durante a sua extensão, sendo trabalhados com o objetivo de obter o melhor modelo final.

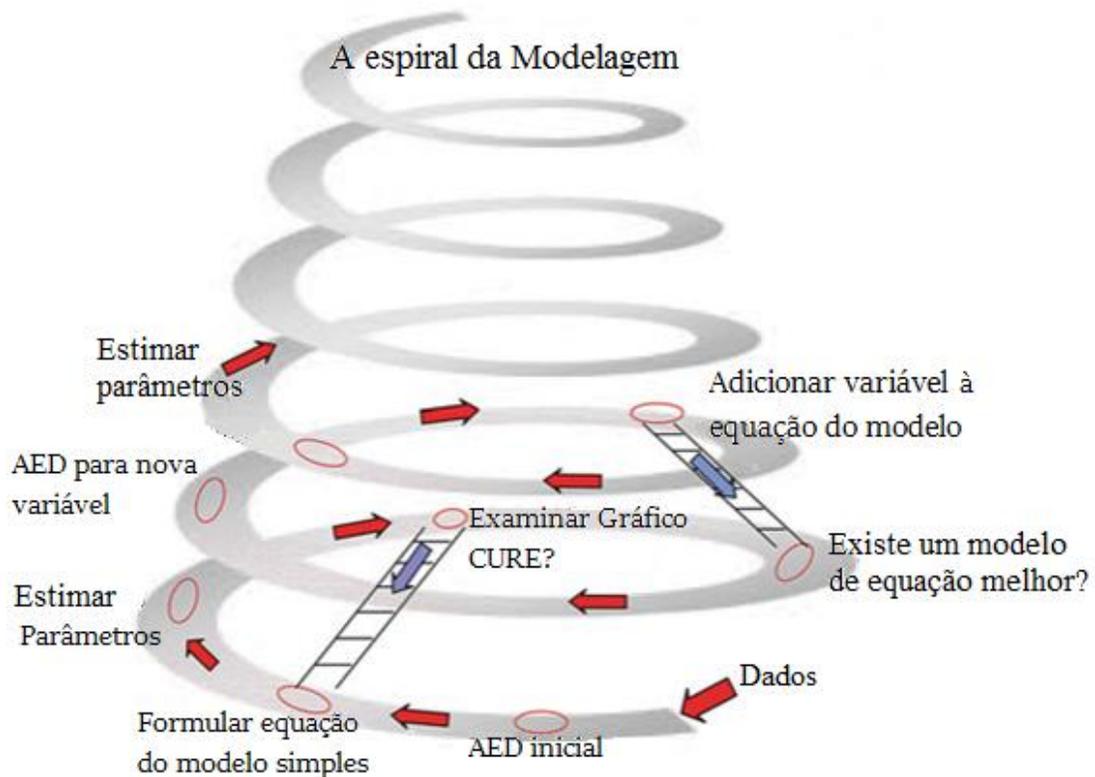


Figura 6: Representação esquemática do processo de modelagem de um MPA
 Fonte: Adaptado de Hauer (2015)

Assim que os dados são disponibilizados em uma planilha, deve-se realizar uma primeira Análise Exploratória dos Dados (AED), com o objetivo de encontrar uma relação ordenada entre os dados de acidentes e as variáveis disponíveis. A partir de ferramentas de análise de dados, por exemplo, a Tabela Dinâmica existente do *Excel*, é possível visualizar essa relação e supor uma função matemática que a possa representar. Antes da definição de quais variáveis independentes devem ser utilizadas no modelo, pode-se fazer uma análise das variáveis utilizadas em MPAs da literatura. Na prática, porém, a decisão de quais variáveis utilizar fica limitada àquelas contidas no banco de dados disponível. Além disso, o MPA não precisa, nem deve, utilizar todas as variáveis disponíveis e nem aquelas que são altamente correlacionadas, pois apenas algumas variáveis explicam a maior parte da variação nos dados de acidentes (Saha *et al.*, 2015).

Um MPA Simples, isto é, um modelo onde há apenas duas variáveis que representam a exposição (Comprimento do Segmento e Volume de Tráfego), pode ser utilizado como o ponto de partida para a modelagem. Ambros e Sedoník (2016) encontraram, a partir do desenvolvimento de modelos para *Freeways* na República Tcheca, que modelos com apenas

essas duas variáveis tiveram um poder explicativo comparável ao de modelos multivariados. Para fins de *ranking* de segurança das rodovias, os MPAs não precisam necessariamente envolver outras variáveis além das do Modelo Simples (Srinivasan *et al.*, 2013).

Assim que uma variável é escolhida, como por exemplo: o Comprimento do Segmento, é necessário o questionamento sobre qual função pode representá-la mais adequadamente. O processo de ajuste do modelo busca transformar os dados de acidentes e as características conhecidas da via em um MPA, crendo existir uma relação ordenada entre as variáveis independentes e a dependente (Hauer, 2015). Uma primeira tentativa de modelagem pode ser feita para o Modelo Simples a partir da Equação 2:

$$N_{previsto} = \beta_0 \times L^{\beta_1} \times VDMA^{\beta_2} \quad (2)$$

Onde:

$N_{previsto}$: Número de acidentes previstos para cada segmento;

L_i : Comprimento do segmento;

VDMA: Volume diário Médio Anual; e

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: Parâmetros de ajuste do modelo.

No entanto, não há um processo definido para orientar o tipo de função matemática a se utilizar. Hauer (2015) orienta que não basta assumir uma função para os dados, diversos tipos de funções podem ser testados: potencial, polinomial, Hoerl, entre outras, sendo a estimativa dos parâmetros uma tarefa secundária. A literatura apresenta muitas experiências, como a de Ambros e Sedoník (2016), que encontram que funções potenciais apresentaram uma melhor representatividade dos dados do que funções exponenciais. Os autores alertam, todavia, que a decisão não deve ser tomada baseada em uma teoria e sim na escolha da função que apresente melhor ajuste e maior simplicidade. Para a determinação dos parâmetros que compõem o modelo em desenvolvimento utiliza-se o método da Máxima Verossimilhança, por meio da Regressão Binomial Negativa, conforme Equação 16 apresentada na Seção 3.2.2.

Para a avaliação da função matemática utilizada e dos seus respectivos parâmetros, utiliza-se a ferramenta visual para análise do desempenho do modelo denominado gráfico CURE (discutido na Seção 3.2.4). É importante considerar que o processo em espiral, visualizado na Figura 6, não possui uma única direção (conforme setas em vermelho). Caso o resultado da função matemática utilizada não seja satisfatório, deve-se retornar a etapa de escolha do modelo matemático (conforme setas em azul) e os parâmetros utilizados para esta nova função devem ser

estimados. Caso o resultado seja positivo, ainda outras tentativas podem ser feitas para melhorar o modelo, utilizando outros tipos de funções.

Seguindo na Espiral da Modelagem da Figura 6, chega-se à etapa de AED para introdução de uma nova variável no modelo. A introdução de uma variável no modelo deve ser considerada se essa atender às seguintes condições: (i) ser um dado disponível e ter relação com a segurança (reduz o viés de uso), e (ii) sua inclusão aumenta a precisão do modelo (reduz o viés de ajuste). Hauer (2015) insiste que os modelos sejam disponibilizados a cada variável introduzida, pois, geralmente, os pesquisadores disponibilizam somente o último MPA estimado. Se um modelo for reportado para cada uma das variáveis adicionadas, todos eles serão potencialmente aproveitáveis, pois o pesquisador pode não saber em que circunstâncias o MPA será usado e quais informações os futuros usuários terão.

Um MPA deve ser explicativo sem ser demasiadamente complexo. Para avaliar a complexidade do modelo utiliza-se o Critério de Informação de Akaike (AIC). Infinitos parâmetros poderiam ser utilizados com o objetivo de melhorar o ajuste do modelo. Todavia, é necessário saber se a adição de um novo parâmetro melhora efetivamente o desempenho do modelo, aumentando o valor de LLnb na função objetivo, ou se o novo parâmetro somente adiciona complexidade ao mesmo. O AIC é um estimador utilizado para medir a qualidade de um modelo e é calculado por 2 vezes o número de parâmetros no modelo menos 2 vezes o valor de LLnb e deve ser minimizado. De acordo com este critério, se um parâmetro adicionado aumentar o logaritmo natural de LLnb em mais de 2,7, esse deve ser incorporado ao modelo.

Juntamente com os gráficos CURE, o AIC deve determinar o ponto em que a Espiral da Modelagem deve parar. Os modeladores podem se sentir instigados a continuar a modelagem até obter o 'Modelo Perfeito', porém, em um certo ponto do processo percebe-se que o MPA não apresenta melhora significativa ao introduzir uma nova variável, este é o fim do desenvolvimento do MPA.

3.2.4. Comparação dos Resultados

Depois das etapas de (i) consolidação e organização da base de dados, (ii) transferência do modelo do HSM e (iii) desenvolvimento de um novo modelo, é necessário avaliar e comparar o desempenho dos MPA abordados, conforme descrito no esquema da Figura 4. Para isto, torna-

se necessário o uso de ferramentas adequadas que possam medir a qualidade do ajuste dos modelos (*goodness-of-fit*) aos dados da jurisdição. Essas ferramentas devem avaliar a qualidade dos modelos (transferido e desenvolvido), através de medidas quantitativas, para determinar se o MPA é aceitável, e julgar, a partir de dois modelos, qual é o melhor. A seguir são apresentadas as ferramentas utilizadas para medir a qualidade de ajuste e assim comparar os modelos obtidos pelos procedimentos contidos nas Seções 3.2.2 (transferência de modelo do HSM) e 3.2.3 (desenvolvimento de um novo modelo).

- **Resíduos Acumulados (CURE)**

Existem diversas medidas de ajuste disponíveis representadas por um número único, no entanto, elas descrevem apenas o ajuste geral do modelo, não sendo possível identificar em quais regiões o modelo representa a realidade dos dados e onde ele diverge, sendo insuficiente para entender para que faixa de valores a variável de um MPA não é explicativa (Hauer, 2015). Para uma análise mais robusta dos resultados é utilizado o gráfico CURE (*CUmulative REsiduals-Resíduos acumulados*), que mostra, de uma maneira intuitiva e visual, como é a qualidade do ajuste e quais são as regiões onde o modelo diverge dos dados observados.

Nessa análise, deseja-se que a soma acumulada dos resíduos de uma variável em um modelo se alterne ao redor do eixo de 0 acidentes acumulados, ficando contido dentro de um intervalo de dois desvios padrões. Grandes quedas verticais no gráfico CURE chamam a atenção e devem ser analisadas mais atentamente. Dessa maneira, essa abordagem permite analisar o desempenho de cada variável independente de um modo simples e prático, melhorando a precisão das análises de segurança (Troyer *et al.*, 2015). A Figura 7 apresenta dois gráficos CURE para duas variáveis diferentes, sendo as linhas pontilhadas os valores superior e inferior de dois desvios padrões, e a linha preta contínua a soma dos resíduos gerado pela diferença entre o número de acidentes previstos e observados. Percebe-se que, como a soma acumulada dos resíduos varia dentro do intervalo pontilhado para a maior parte do intervalo das variáveis, o MPA apresenta bons resultados de ajuste.

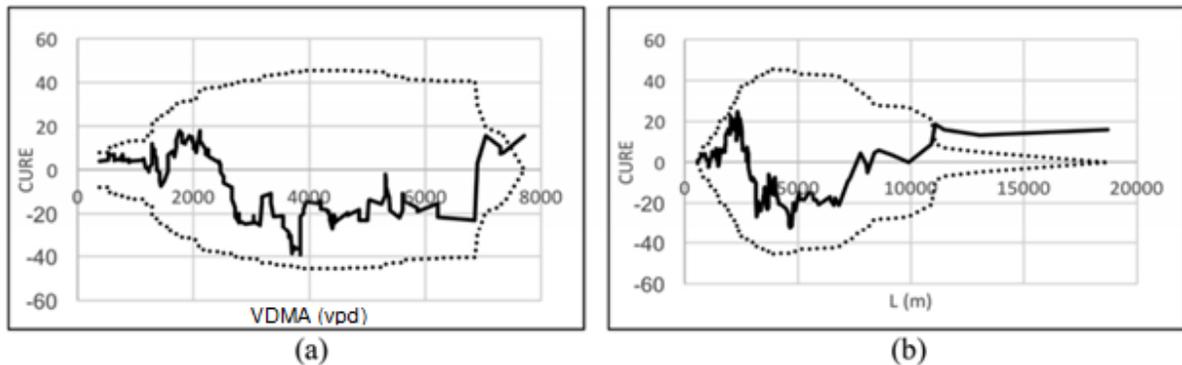


Figura 7: Gráficos CURE para: (a) VDMA e (b) Comprimento do Segmento
Fonte: Adaptado de Llopis-Castelló *et al.* (2019)

No caso “a” da Figura 7, percebe-se que a soma dos resíduos acumulados ao longo da variável Volume de Tráfego está predominantemente contida dentro dos limites. Já o caso “b” mostra que o modelo apresenta boas previsões para valores de Comprimento do Segmento abaixo de cerca de 11000 metros. A partir deste valor, o MPA passa a prever menos acidentes do que o observado nos dados de acidentes.

- **Medidas de ajuste da Função Objetivo**

A Função objetivo expressa na Equação 16 deve ser maximizada para a estimativa dos múltiplos fatores de calibração e os parâmetros que compõem a função de calibração e o MPA desenvolvido. Por isso, conforme apresentado nos estudos de Srinivasan *et al.* (2016), Farid *et al.* (2018) e Matarage e Dissanayake (2020), quanto maior for o valor de LLnb, melhor será a qualidade de ajuste do modelo. Desta maneira, o valor de LLnb pode servir como medida de ajuste do modelo.

$$LLNB = \sum_{i=0}^n [\ln \Gamma (k_i + \varphi L_i) - \ln \Gamma (\varphi L_i) + \varphi L_i \ln (\varphi L_i) + k_i \ln (\mu_i) - (\varphi L_i + X) \times \ln (\varphi L_i + \mu_i)] \quad (16)$$

Onde:

k_i, μ_i : Número de acidentes observados e previstos para cada segmento, respectivamente;

L_i : Comprimento do segmento em milhas; e

φ : Parâmetro de ajuste do modelo.

Porém, além de determinar os parâmetros utilizados no MPA, a Função Objetivo possui seus próprios parâmetros. Estes podem ser utilizados como medidas de ajuste do modelo. O parâmetro φ , que indica a sobredispersão inversa do modelo e pode ser utilizada para medir a qualidade do ajuste. Quanto maior o valor do parâmetro φ , menor será a variância dos valores

previstos e menor será a sobredispersão, sendo o seu valor também utilizado para estimar o peso da estimativa (w) de N_{previsto} determinado pelo MPA no cálculo do método Empírico de Bayes (Equação 1) (Hauer, 2001). O valor de w pode ser calculado conforme a Equação 17 a seguir:

$$w = \frac{1}{1 + \frac{\sum N_{\text{previsto}}}{\varphi \times L}} \quad (17)$$

Onde:

w : Ajuste do peso a ser colocado no valor de N_{previsto} no resultado final (Nesperado);

$\sum N_{\text{previsto}}$: Soma da N_{previsto} para o segmento para todos os anos período de estudo;

φ : Parâmetro sobredispersão inverso do modelo; e

L : Comprimento do segmento em miihas.

- **Parâmetro R^2**

O coeficiente de determinação, também chamado de R^2 , é o resultado do quadrado do coeficiente de correlação Pearson entre duas matrizes de dados, conforme a Equação 18 a seguir. O R^2 varia entre 0 e 1, por vezes sendo expresso em termos percentuais. Assim, quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo linear, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. Por exemplo, um $R^2=0,8234$ significa que o modelo linear explica 82,34% da variância da variável dependente a partir dos regressores (variáveis independentes) incluídas naquele modelo linear.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (18)$$

Onde:

x e y : São o valor de duas matrizes diferentes, enquanto que \bar{x} e \bar{y} são as suas respectivas médias.

- **$\sum |\text{dif}|$ e $\sum |\text{dif}|^2$**

Essas duas medidas permitem verificar em quantos acidentes o N_{previsto} divergiu de $N_{\text{observado}}$ ao longo de todas as observações devido a utilização da soma do absoluto da diferença entre os dois valores. Quando o valor de $|\text{dif}|$ é elevado ao quadrado, a medida tende a demonstrar mais claramente essa diferença, sendo afetada diretamente por grandes diferenças entre os valores previsto e observado.

- **MAPE ou MAPD**

O MAPE (*Mean absolute percentage error* ou *Mean Absolute error Percentage*) mede a proporção entre $\sum |dif|$ e a soma dos acidentes observados. Esta medida geralmente expressa a precisão de um modelo como uma porcentagem e é definida pela Equação 19. Esta medida tem sido amplamente utilizada para avaliar o ajuste de MPA (Qin *et al.*, 2016; Farid *et al.*, 2018a; Farid *et al.*, 2019)

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |N_{observado} - N_{previsto}|}{\sum_{i=1}^n N_{observado}} \quad (19)$$

Onde:

N obs: Número de acidentes observados para o segmento i; e

N Prev: Número de acidentes previstos para o segmento i.

3.3. SÍNTESE DO CAPÍTULO

A Figura 4 apresenta as etapas do método de trabalho para a comparação dos MPAs para segmentos rodoviários de pista simples segundo duas abordagens: a transferência do modelo do HSM e o desenvolvimento de novos modelos. Primeiramente é apresentada a etapa de Consolidação e Organização do Banco de Dados (3.2.1), seguido de duas etapas paralelas: a Transferência do Modelo do HSM (3.2.2) e o Desenvolvimento de Novos Modelos (3.2.3), para que, por fim, possa ser realizada a etapa da Comparação dos Resultados obtidos pelas duas abordagens (3.2.4).

A primeira etapa vem a ser muito dispendiosa devido a grande e variada quantidade de dados que devem ser coletados. Geralmente estes são extraídos de mais de uma base de dados, necessitando de muitas horas de trabalho para serem compatibilizados e consolidados em um único banco de dados. Depois disso deve ser feita a segmentação da rede viária, onde os segmentos homogêneos são gerados (padrão do HSM), ou outro tipo de segmentação analisado, devem receber um único dado por variável. Somente quando esta etapa estiver concluída é que as duas etapas seguintes para a obtenção dos MPAs podem ser executadas.

A transferência do HSM é feita a partir de 3 métodos: diretamente, por fatores de calibração e por funções de calibração. Para a aplicação direta deve se aplicar as Equações 6 e 3 a todos os segmentos da base de dados, de modo a encontrar o valor de $N_{previsto}$. Para obter a calibração descrita pelo HSM, deve ser calculado o fator de calibração (Cr) por meio da Equação

4 e então aplicado na Equação 3 novamente. Múltiplos fatores, bem como funções de calibração podem ser utilizados para obter um melhor ajuste do modelo. Os múltiplos fatores e os parâmetros da função de calibração devem ser estimados a partir da máxima verossimilhança por meio da Equação 16 e o Critério de Informação de Akaike

O desenvolvimento dos novos modelos segue a “espiral da modelagem” descrita por Hauer (2015). Primeiramente é estimado o MPA simples, contendo somente as variáveis Comprimento do Segmento e Volume de Tráfego. São então adicionadas ao modelo simples outras variáveis separadamente, gerando múltiplos modelos. O modelo deve ser registrado a cada nova variável que ingressa no modelo, possibilitando a sua utilização futura, dependendo das variáveis disponíveis. Os parâmetros também devem ser estimados pela Equação 16 e o Critério de Informação de Akaike, analisando continuamente o comportamento dos gráficos CURE.

Com os diferentes modelos obtidos para as duas etapas anteriores é possível realizar a comparação das duas abordagens. Para isso utiliza-se principalmente os gráficos CURE para analisar o desempenho dos modelos ao longo de diferentes variáveis, o resultado da maximização da função objetivo e o parâmetro ϕ , que indica a sobredispersão. Além desses são analisados os valores dos testes de R^2 , a soma dos resíduos ($\sum|dif|$ e $\sum|dif|^2$) e MAPE, bem como a experiência durante as etapas anteriores.

4. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados da aplicação dos Procedimentos Metodológicos, a comparação e a discussão dos resultados obtidos.

4.1. RESULTADOS DA CONSOLIDAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA BASE DE DADOS

A base de dados utilizada nesse estudo é composta de 5 rodovias de pista simples do estado do Rio Grande do Sul, totalizando 1723,47 quilômetros. As rodovias analisadas abrangem extensões tanto em relevo plano, quanto em relevo ondulado e montanhoso, apresentando características diversas em relação à geometria. As rodovias utilizadas neste estudo fazem parte de 65 unidades do Sistema Nacional de Viação (SNV) utilizado pelo DNIT. Na Figura 8 é possível localizar essas rodovias no mapa do estado.

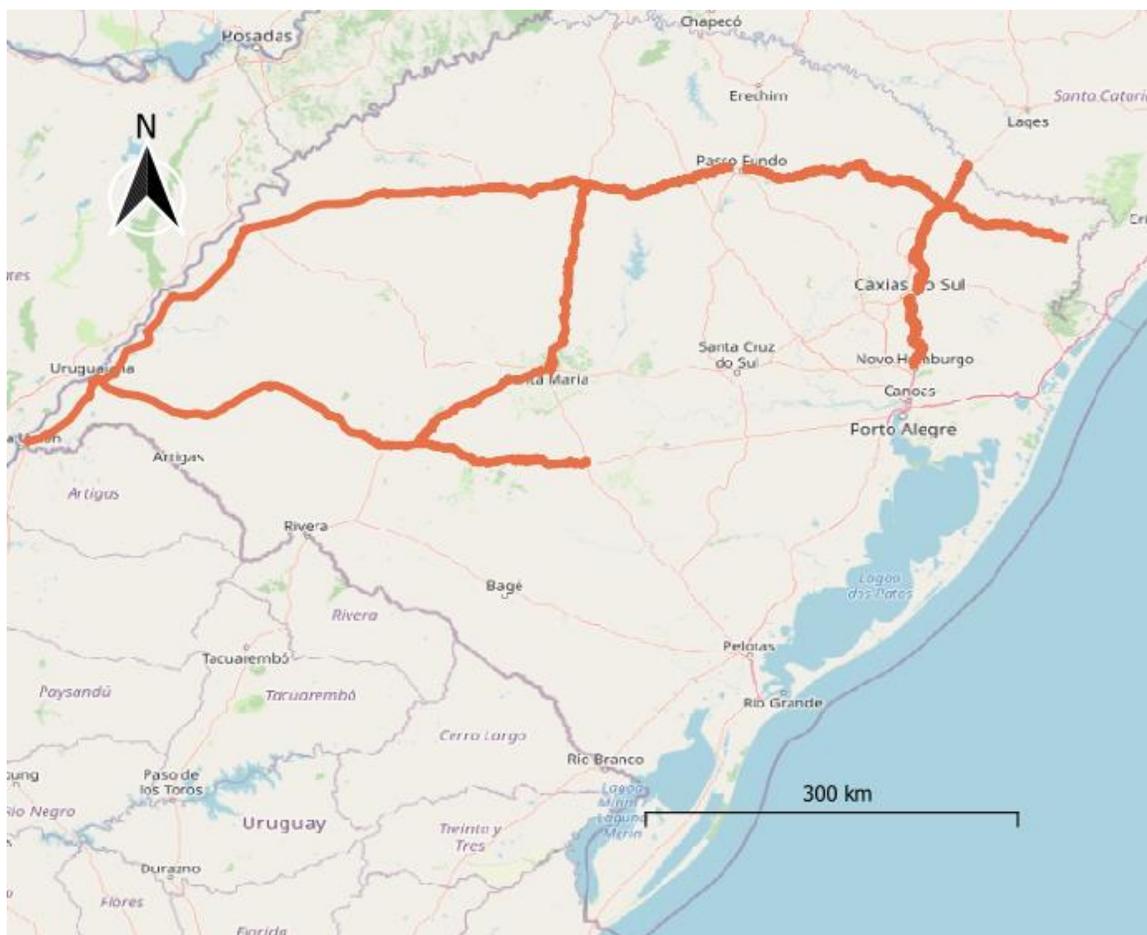


Figura 8: Em vermelho, as rodovias gaúchas utilizadas no estudo

Todos os segmentos rodoviários utilizados são considerados como de característica rural, uma vez que todos os segmentos de rodovias federais que cruzam alguma área urbana foram desconsiderados da base de dados do estudo. A Tabela 13 permite identificar o nome das rodovias utilizadas para o estudo, bem como a sua respectiva extensão e o número de unidades do SNVs que nela se encontram.

Tabela 13: Extensão das rodovias utilizadas no estudo

Rodovia	Extensão (km)	SNV's
BR116	180,45	8
BR158	276.20	10
BR285	634,26	29
BR290	386.28	5
BR472	246.28	13
Total	1723.47	65

4.1.1. Características Geométricas das Rodovias

O HSM fornece uma lista de dados geométricos requeridos e desejáveis para a calibração do MPA de rodovias de pista simples (Tabela 2). A partir dela foram coletados os dados utilizados neste estudo, utilizados tanto para a calibração do modelo do HSM, quanto para o desenvolvimento de novos modelos. A Tabela 14 apresenta os dados que foram coletados e a sua respectiva fonte. No caso de os dados de um elemento não estarem disponíveis, este estudo assume uma condição padrão. A seguir são apresentadas as fontes das bases de dados utilizadas, e o seu modo de coleta.

Tabela 14: Dados coletados para a realização do estudo

Elemento de Dados	Disponível	Fonte	Assume-se como:
Comprimento do segmento	Sim	ROCA + BR-Legal	-
Volume diário médio anual	Sim	Dados PNCT	-
Comprimento de curva horizontal e tangente	Sim	ROCA + BR-Legal	-
Raio das curvas horizontais	Sim	ROCA + BR-Legal	-
Presença de curva de transição	Não	-	Sempre com transição
Diferença do projeto para superelevação	Não	-	Igual ao projeto
Tipo de Terreno	Sim	BR-LEGAL	-
Largura da Faixa	Sim	BR-LEGAL	-
Tipo de acostamento	Sim	Google Street	-
Largura do acostamento	Sim	BR-LEGAL	-
Presença de iluminação	Não	-	Sem iluminação
Densidade de acessos	Sim	BR-LEGAL + Google Earth	-
Presença de faixa de ultrapassagem	Sim	Google Earth	-
Presença de segmento com 4 faixas	Sim	Google Earth	-
Presença de faixa de conversão à esquerda	Não	-	Sem faixa de conversão
Presença de guia sonora central	Não	-	Sem guia sonora
Design lateral da Rodovia (RHR)	Sim	Google Street	-
Uso de fiscalização eletrônica de velocidade	Não	-	Sem fiscalização

- **Programa BR-LEGAL**

O estudo utilizou diversas informações oriundas do programa BR-Legal (DNIT, 2013), que buscou renovar a sinalização das rodovias federais em todos os estados da federação. Apesar de nem todas as obras terem sido concluídas até o momento deste estudo, a etapa de projeto resultou em um banco de dados extenso e disponível em todos os estados do Brasil. Os relatórios do programa apresentam dados das características dos segmentos rodoviários gerados, registro da

sinalização vertical e horizontal, curvas horizontais, áreas de escape, interseções e acessos, entre muitas outras informações.

A malha de rodovias federais foi separada em 108 lotes nos 26 estados e no Distrito Federal. Somente no estado do Rio Grande do Sul foram 5.095 quilômetros, contidos em 10 lotes, conforme mostra a Figura 9. Cada lote foi assumido por uma empresa ou consórcio por meio de uma licitação em RDC (Regime Diferenciado de Contratação), na forma de contratação integrada, isto é, a empresa responsável pelo projeto é também responsável pela execução. As informações das rodovias foram então levantadas diretamente em campo e repassadas ao DNIT de acordo com o edital do BR-Legal (DNIT, 2015). Os dados do BR-LEGAL foram assim cedidos cortesmente para a realização deste trabalho. As rodovias presentes no estudo pertencem aos lotes 63, 65, 88 e 89.

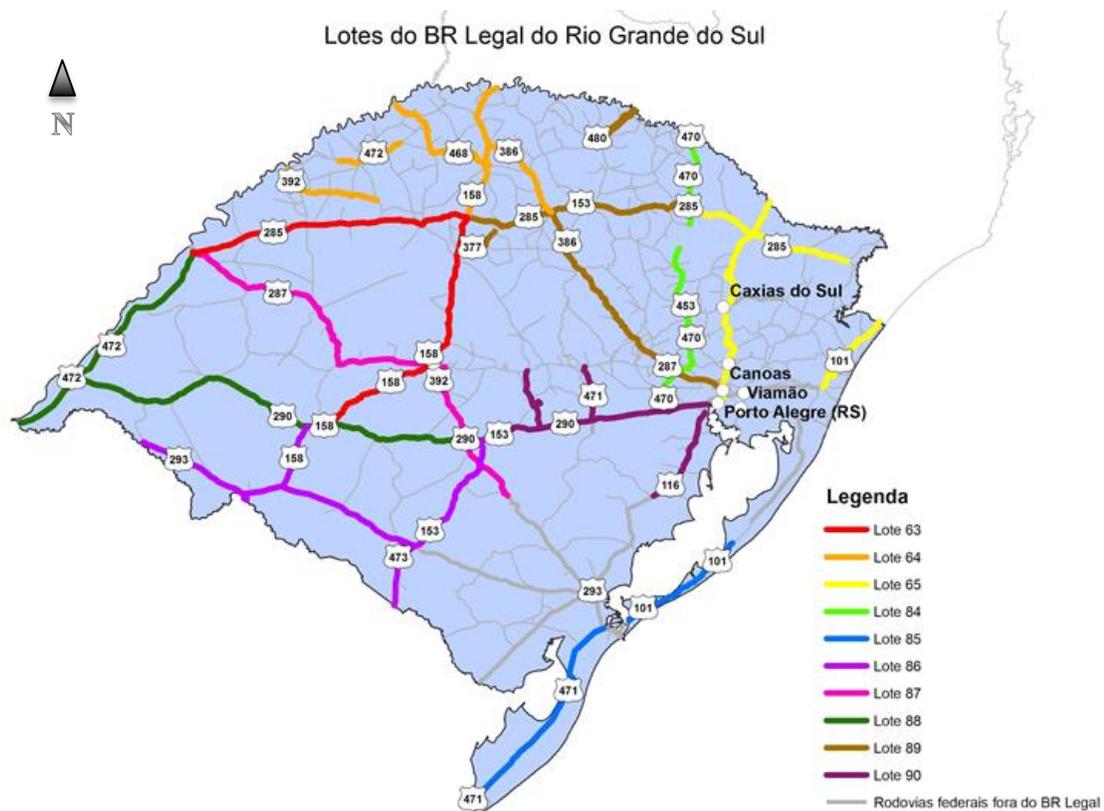


Figura 9: Representação dos lotes do BR-LEGAL
Fonte: DNIT

Por meio dos dados disponíveis nos relatórios do BR-LEGAL foram obtidos (conforme Tabela 14): Comprimento de segmentos, a largura da pista, do acostamento, tipo de relevo, quantidade e localização de acessos, tipo de pavimento, dados de curvas, tipo do entorno da

rodovia, entre outros. Optou-se por não utilizar as informações de curvas horizontais e tangentes, bem como os raios das curvas, visto que o padrão das informações divergia entre lotes, além de ser diferente do ideal. Por esse motivo, decidiu-se obter os dados de curvas horizontais e tangentes de outra maneira.

- **Software ROCA**

Para um levantamento mais profundo e padronizado das características geométricas das rodovias, utilizou-se o *software* ROCA (ROad Curvature Analyst). O ROCA é uma ferramenta para identificação automática da geometria de rodovias a partir de dados vetoriais digitais. O método é capaz de identificar eficientemente curvas circulares com seus raios e tangentes (seções retas), que são os resultados do ROCA como características de linha, como na Figura 10. Também é possível calcular atributos de curvatura (ângulo médio de deflexão, taxa de desvio e número de voltas) para cada linha de entrada como novos atributos (Bíl *et al.*, 2018).



Figura 10: Geração de uma curva horizontal no ROCA

Fonte: Bíl *et al.* (2018)

Por meio do *software* Saepro foram lançados os eixos planimétricos das rodovias estudadas e então levados para o ROCA para que fossem identificadas as tangentes e curvas

horizontais com seus respectivos raios. A partir da combinação destas informações e as do BR-LEGAL, chegou-se aos segmentos utilizados para a realização do estudo.

- **Google Street e Google Earth**

Os dados de satélite e de mapa foram utilizados para obtenção de dados, como a presença da faixa de ultrapassagem e o RHR (Road Hazard Ratio). Estes dados ainda foram consultados para a verificação e complementação de dados do BR-LEGAL, como por exemplo o cadastramento de acessos da rodovia e a checagem das características dos acostamentos.

4.1.2. Dados de Exposição

Os dados de tráfego foram extraídos do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT, 2020), que identificou 320 locais no país para receber a instalação dos postos de coleta permanentes. Para a consolidação do PNCT, além de definir um plano sistematizado de contagem de tráfego permanente nas rodovias federais, são realizadas pesquisas Origem e Destino com o objetivo de expandir as informações de tráfego para toda a malha rodoviária federal. Para a realização deste estudo, utilizou-se a estimativa de VDMA (Veículos Médio Diário Anual) para os anos de estudo de 2017 a 2019. Além da estimativa do VDMA, os dados do PNCT também foram utilizados para a obtenção da porcentagem do número de veículos pesados na composição do tráfego e o nível de serviço (classificado como de A até F).

4.1.3. Dados de acidentes

A base de dados de acidentes foi extraída dos dados abertos da Polícia Rodoviária Federal (PRF), disponibilizados anualmente desde 2007 (DPRF, 2021a). Todo acidente registrado apresenta as seguintes informações: dia, hora, rodovia, cidade, quilômetro, coordenadas, causa do acidente, tipo de pista, traçado da via, número de mortos, número de feridos (leves, graves e total de feridos) e o número de veículos envolvidos no acidente.

Este trabalho limitou-se ao uso dos dados de acidentes entre os anos de 2017 a 2019, visto que somente estes possuíam o ano completo com informações georreferenciadas, possibilitando registrar a localização dos acidentes dentro da área de um *buffer* de 100 m a partir do eixo central da rodovia. Os acidentes ocorridos fora de rodovias rurais de pista simples, em rotatórias, interseções, retornos regulamentados e desvios temporários foram excluídos do banco de dados,

Tabela 15: Proporção da severidade dos acidentes em segmentos de pista simples de acordo com o HSM e os dados da PRF, para as rodovias federais do estado do Rio Grande do Sul

HSM		Dados PRF	
Fatal (K)	1,3%	Mortes	6,7%
Lesão incapacitante (A)	5,4%	Feridos graves	50,8%
Lesão não incapacitante (B)	10,9%	Feridos leves	10,9%
Possível lesão (C)	14,5%		
Total com feridos (ABC)	30,8%	Feridos Total	61,7%
Total de fatal mais feridos (KABC)	32,1%	Mortos mais Feridos	68,3%
Somente danos materiais (PDO)	67,9%	Acidentes sem vítimas	31,7%
Total (KABCO)	100,0%	Acidentes Totais	100,0%

Tabela 16: Distribuição padrão por tipo de colisão para cada nível de severidade

Tipo de Colisão	Porcentagem do Total de Acidentes em Segmentos Rodoviários por nível de severidade		
	Feridos e Fatais	Danos Materiais	Total Combinado
Acidentes com um único veículo			
Colisão com animal	1,5%	1,8%	3,3%
Colisão com pedestre	3,3%	0,0%	3,3%
Capotamento	1,4%	0,8%	2,3%
Saída de Pista	17,2%	10,5%	27,7%
Outros tipos	8,7%	5,5%	14,2%
Total (Um veículo)	32,1%	18,6%	50,8%
Acidentes com Múltiplos veículos			
Colisão Transversal	12,3%	2,7%	14,9%
Colisão Frontal	9,1%	1,0%	10,1%
Colisão Traseira	8,2%	5,1%	13,3%
Colisão Lateral	6,1%	3,5%	9,7%
Outros	0,5%	0,7%	1,2%
Total (múltiplos veículos)	36,2%	13,0%	49,2%
Total de acidentes	100,0%	100,0%	100,0%

Comparando as proporções de severidade dos acidentes fornecidas pelo HSM e presentes no banco de dados da PRF presentes na Tabela 15, percebe-se que uma maior proporção de

acidentes de baixa severidade nas rodovias americanas. Isso pode ser explicado pelo fato de que desde 2016 a PRF adotou a DAT (Declaração de Acidente de Trânsito). Por esse método, a ocorrência de trânsito pode ser registrada virtualmente, desde o acidente não se encaixe em nenhuma das seguintes categorias (DPRF, 2021b):

- Não pode ter vitimado ninguém, nem mesmo levemente;
- Não pode ter provocado vazamento ou derramamento de produto perigoso; avaria nas embalagens dos produtos perigosos fracionados; dano no equipamento de transporte de produto perigoso a granel (por exemplo, uma carroceria do tipo tanque);
- Não pode ter provocado danos a bens públicos da PRF; e
- Não pode ter ocorrido incêndio, abrangendo pelo menos um terço das dimensões do veículo ou submersão em algum dos veículos envolvidos.

Visto que o banco de dados de acidentes da PRF apresenta a característica de subnotificação de acidentes de baixa severidade (Acidentes sem vítimas), o presente estudo optou por focar nos dados de acidentes com alta severidade (Acidentes com feridos e mortos).

4.1.4. Segmentação

A partir da consolidação do banco de dados, foram realizados dois tipos diferentes de segmentação, de modo a apresentar alternativas que variem de complexidade. Estabeleceu-se um comprimento mínimo de 160 m para cada segmento, conforme recomendação do HSM, além de estabelecer-se um comprimento máximo de 10 km, para a realização de futuras análises práticas. Esses procedimentos produziram 2421 e 869 segmentos segundo as metodologias de segmentação homogênea e a feita com base nos dados Programa BR-LEGAL do DNIT, respectivamente.

- **Segmentação Homogênea**

A segmentação homogênea foi gerada segundo a orientação do HSM (AASHTO, 2010). Por esta segmentação, um novo segmento é gerado sempre que houver uma troca em uma das características da via. Devido a limitação do tamanho dos segmentos, se houver uma segunda troca em uma das variáveis dentro de uma distância de 160m, como por exemplo, o comprimento da faixa passando de 3,3m para 3,5m, mantém-se o valor mais crítico, nesse caso, o valor de

3,3m. Se um segmento ultrapassar o comprimento de 10 km, gera-se um novo segmento, a partir deste limite, com as mesmas características. As estatísticas descritivas das variáveis relacionadas a segmentação homogênea são apresentadas na Tabela 17. O asterísco registrado para o valor Máximo da Largura da Faixa registra o provável erro da leitura por meio da coleta do BR-Legal, sendo corrigido pelo modo de cálculo do CMF 2.

Tabela 17: Estatística descritiva de variáveis relacionadas à segmentação homogênea

<i>Variável</i>	<i>Frequência</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Comprimento (m)	2421	711,9	1122,0	160	10000
VDMA (veíc/dia)	-	3689	1150,5	639	8353
Largura da faixa (m)	-	3,33	0,26	2,40	8,00*
Acessos por km	-	2.32	3,50	0,00	60.5
Raio (curva horizontal) (m)	1117	364	214,1	45	1200
Acidentes Totais	2175	0,90	1,06	0	35
Mortos e Feridos	1434	0.59	0,81	0	29

- **Segmentação com dados do DNIT**

A segunda segmentação foi gerada a partir dos dados de segmentos encontrados nas planilhas do banco de dados gerado pelo programa BR-LEGAL do DNIT (DNIT, 2015). Esta segmentação divide o segmento conforme mudanças no relevo (plano, ondulado e montanhoso), quantidade de pistas (simples e dupla) e entorno (rural e urbano). As estatísticas descritivas das variáveis relacionadas a esta segmentação são apresentadas na Tabela 18. O asterísco presente tem a mesma função que na tabela anterior.

Tabela 18: Estatística descritiva de variáveis relacionadas à segmentação do DNIT

<i>Variável</i>	<i>Frequência</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Comprimento (m)	869	1980,2	2668,8	185	10000
VDMA (veíc/dia)	-	3556	1315,1	639	8353
Largura da faixa (m)	-	3,25	0,262	2,40	7,20*
Acessos por km	-	2,31	2,69	0,00	34
Raio (curva horizontal) (m)	478	383	238.6	45	1100
Acidentes Totais	2196	2,46	2,78	0	41
Mortos e Feridos	1443	1,62	1,96	0	29

Analisando as Tabelas 18 e 19, percebe-se que os segmentos gerados a partir dos dados do DNIT apresentam segmentos maiores e por isso também uma maior média de acidentes por segmento. Porém, junta a esta segmentação está uma grande perda de informação, visto que

dentro em um segmento, uma variável que poderia ter três valores diferentes, teria de ser limitada a somente um, sendo este o valor mais crítico. Os segmentos gerados dessa forma também podem possuir diversas tangentes e curvas horizontais, os quais não seriam contados, enquanto os segmentos homogêneos possuem somente um dos dois tipos. Para cada segmento da Tabela 19 considerou-se somente o dado crítico representando cada variável.

Devido a diferença entre as características apresentadas dos dois tipos de segmentação e as orientações presentes no HSM, optou-se por não transferir o modelo do HSM para os segmentos gerados a partir dos dados do DNIT, mas somente para os segmentos homogêneos. Todavia, visto que os dados do BR-Legal cobriram toda a malha de rodovias federais do país, já estando disponíveis para utilização em abrangência nacional, decidiu-se investigar a diferença entre as duas segmentações para os modelos desenvolvidos neste estudo.

4.2. RESULTADOS DA TRANSFERÊNCIA DO MODELO DO HSM

Com o processo de segmentação concluído é possível realizar o processo de transferência do modelo do HSM para as rodovias de pista simples do estado do Rio Grande do Sul. Diferentes métodos são utilizados buscando obter a melhor transferibilidade do modelo americano para a base de dados local. Os resultados foram registrados para cada um dos métodos testados, possibilitando a sua posterior comparação.

4.2.1. Aplicação Direta

O primeiro método de transferibilidade do modelo do HSM testado é a sua aplicação direta no banco de dados do estudo. Ainda que o HSM recomende a calibração do modelo, mesmo para as rodovias dos Estados Unidos, esta é uma primeira aproximação para a utilização do modelo. Calcula-se primeiramente, para cada um dos 2569 segmentos homogêneos, a frequência de acidentes esperada para as condições do segmento rodoviário base, conforme a Equação 6.

$$N_{SPF} = VDMA \times L \times 365 \times 10^{\alpha} \times e^{\beta} \quad (6)$$

Analisando o segmento de número 1, pertencente à BR 116, encontrado no SNV 116BRS3010, observamos as seguintes características na Tabela 19:

Tabela 19: Características do Segmento Homogêneo 1

ID do Segmento	1
L (m):	165
VDMA (veículos por dia):	
- 2017	5097
- 2018	5579
- 2019	5154
Largura da Faixa (m):	3.75
Largura do acostamento (m):	2.50
Tipo de terreno:	Ondulado
Acessos por km:	12.1
Raio da curva (m):	110
Desenvolvimento (m):	165
Design Lateral da Rodovia (RHR):	3
Faixa de Ultrapassagem:	Não

A partir da Equação 6, estima-se o N_{SPF} previsto para os três anos, para o segmento padrão de rodovias rurais de pista simples do HSM (parâmetros α e β presentes no manual):

$$N_{SPF} = 5097 \times 165/1609 \times 365 \times 10^{-6} \times e^{-0,312} + 5579 \times 165/1609 \times 365 \times 10^{-6} \times e^{-0,312} \\ + 5154 \times 165/1609 \times 365 \times 10^{-6} \times e^{-0,312}$$

$$N_{SPF} = 0,140 + 0,153 + 0,141 = 0,434 \text{ acidente previsto para os 3 anos}$$

Para ajustar as condições do segmento padrão às condições do segmento em análise, deve-se multiplicar, conforme a Equação 3, o valor de N_{SPF} pelo resultado da multiplicação de cada um dos CMFs referentes ao segmento, conforme calculado na Tabela 20. Nesta seção o valor de Cr (Fator de calibração) será considerado como 1,00.

Tabela 20: Resultados para a calibração direta do HSM

CMF	Valor	Observação
1	1,00	Largura da Faixa
2	0,94	Largura e tipo de acostamento
3	2,69	Curva Horizontal
4	1,00	Superelevação
5	1,10	Tipo de Terreno (Greide)
6	1,29	Densidade de Acessos
7	1,00	Guia sonora central
8	1,00	Faixa de ultrapassagem
9	1,00	Faixa de conversão à esquerda
10	1,00	Design lateral da rodovia (RHR)
11	1,00	Presença de Iluminação
12	1,00	Fiscalização automática de velocidade
II	3,58	

$$N_{\text{previsto}} = \text{NSPF} \times \prod_{n=1}^{12} \text{CMF}_n \times \text{Cr} \quad (3)$$

$$N_{\text{previsto}} = 0,434 \times 3,58 = 1,55 \text{ acidentes previsto para os 3 anos do estudo}$$

Aplicando as Equações 6 e 3 para todos os segmentos homogêneos da base de dados permite encontrar o número total de acidentes esperados por SNV, ou por rodovia, para os anos do estudo. Multiplicando o N_{previsto} para cada segmento pela proporção de acidentes de alta severidade calculada (acidentes com feridos ou mortos) (Tabela 15), obtém-se também o N_{previsto} com feridos ou mortos. A Tabela 21 apresenta os resultados da aplicação direta do modelo do HSM para cada uma das rodovias do estudo, tanto para o número total de acidentes, quanto para acidentes com alta severidade.

Tabela 21: Resultados da aplicação direta do HSM

Rodovia	Extensão (km)	Segmentos	CMF médio	Acidentes Totais		Acidentes com feridos ou mortos	
				Obs.	Prev.	Obs.	Prev.
BR-116	180,3	714	2,454	453	805	305	259
BR-158	276,2	305	1,030	369	551	250	177
BR-285	634,3	976	1,080	837	1397	569	449
BR-290	386,3	291	1,137	371	629	227	202
BR-472	246,3	135	1,121	145	297	83	95
Geral	1723,3	2421	1,235	2175	3680	1434	1182

4.2.2. Fator de Calibração

Percebe-se, analisando a Tabela 21, que o número de acidentes previstos é significativamente maior que o de observados, com relação ao número total de acidentes, e relativamente menor, comparado ao número de acidentes com feridos ou mortos. Por meio da utilização de Fatores de Calibração é possível fazer com que o número de acidentes Observados e o número de acidentes Previstos (N_{previsto}) pelo modelo venham a ser equivalentes.

- **Aplicação do fator de calibração único**

Para isto, pode-se utilizar um número único ao multiplicado pelo N_{previsto} , como na Equação 3. A partir da soma de todos os acidentes observados, dividido pela soma de todos os acidentes previstos, conforme a Equação 4, encontra-se o fator de calibração único (Cr). Separando os acidentes por severidade, de acordo com as proporções padrão do HSM, estima-se

um fator de calibração único para cada rodovia, para acidentes totais e com feridos ou mortos, conforme a Tabela 22.

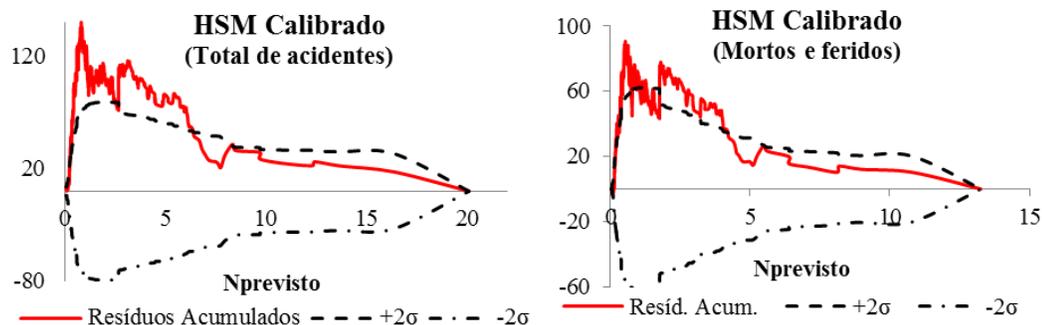
$$Cr = \frac{\sum_{\text{Todos os segmentos}} N_{\text{observado}}}{\sum_{\text{Todos os segmentos}} N_{\text{previsto}}} \quad (4)$$

Tabela 22: Fator de calibração (Cr) estimado por rodovia e severidade, pelo MPA do HSM

Rodovia	Acidentes Totais			Acidentes com feridos ou mortos		
	Nobs.	Nprev.	Cr	Nobs.	Nprev.	Cr
BR-116	453	805	0,562	305	259	1,178
BR-158	369	551	0,669	251	176	1,412
BR-285	837	1397	0,599	571	449	1,268
BR-290	371	629	0,590	225	203	1,124
BR-472	145	297	0,488	82	93	0,871
Geral	2175	3680	0,591	1434	1182	1,213

Os resultados expostos na Tabela 22 mostram que os fatores de calibração de todas as rodovias, bem como para as rodovias em geral, apresentam um valor baixo de N_{previsto} de total de acidentes, aproximando-se da metade do número de acidentes observados. Porém, quando analisados os fatores de calibração para o modelo que estima o N_{previsto} para acidentes com feridos e mortos, este valor se encontra próximo a 1,00.

Todavia, o valor de Cr não é uma medida que represente a qualidade do ajuste de um MPA. A análise gráfica dos resíduos acumulados (CURE) é uma ferramenta mais adequada para verificar em todo o alcance de uma variável, o desempenho do MPA analisado. A Figura 12 mostra a disposição da soma dos resíduos ao longo de três variáveis: o N_{previsto} , o Comprimento do Segmento e o Volume de Tráfego. Os gráficos CURE para estas três variáveis podem ser vistos, tanto para o total de acidentes (à esquerda), quanto para acidentes com mortos ou feridos (à direita).



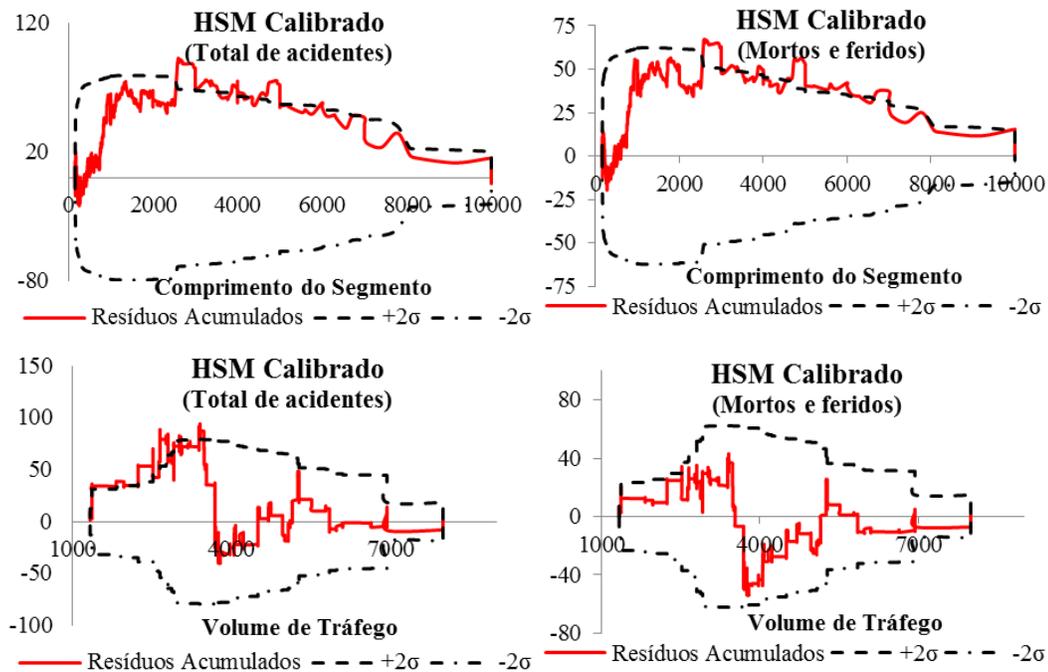


Figura 12: Gráficos CURE do MPA do HSM calibrado por um fator de calibração (Cr)

Ao analisar os gráficos dos resíduos acumulados, de acordo com a Figura 12, percebe-se que os valores não se alteraram ao longo do eixo horizontal em 0, para todas as variáveis analisadas, mas principalmente para o gráfico de N_{previsto} , estando acima do limite de dois desvios padrões para grande parte dos segmentos. O fato de a curva (em vermelho) estar consistentemente próxima da linha que representa $+2\sigma$ indica que o modelo prevê menos acidentes que os observados para a maior parte das variáveis analisadas. Os gráficos CURE apresentaram resultados levemente melhores para previsão de acidentes com feridos ou mortos, ainda assim, o modelo do HSM calibrado por um único fator não apresentou um bom ajuste aos dados, não representando a realidade para a maioria dos intervalos analisados.

- **Aplicação de múltiplos fatores de calibração**

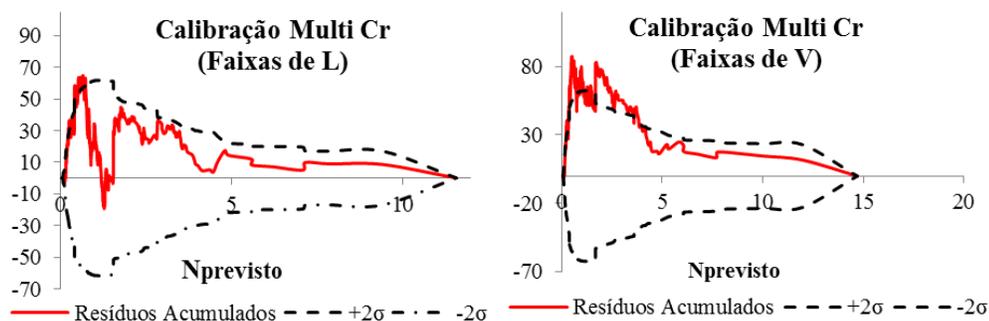
Com o objetivo de aperfeiçoar o desempenho do MPA, mais de um fator de calibração pode ser utilizado. Neste segundo método são testadas três abordagens: (L) divisão em faixas de Comprimento dos Segmentos; (V) divisão em faixas de Volume de Tráfego e (R) divisão entre segmentos rodoviários localizados na Região leste e oeste do estado. Diversas faixas de valores foram testadas, e a partir da maximização da verossimilhança chegou-se aos fatores de calibração para o N_{previsto} com mortos ou feridos, contidos na Tabela 23 a seguir:

Tabela 23: Diferentes fatores de calibração para a calibração do MPA do HSM

Variável	Faixa de análise	Fator de Calibração	ϕ	LLnb
L - Comprimento do Segmento (m)	$L < 500$ m	1,239	2,205	-1453,6
	$500 \leq L < 1800$ m	1,373		
	$L \geq 1800$ m	1,059		
V - Volume de Tráfego (veíc/dia)	$VDMA < 2500$	1,471	2,195	-1455,5
	$2500 \leq VDMA < 5000$	1,150		
	$VDMA \geq 5000$	1,344		
R - Região do Estado	Leste	1,217	2,159	-1458,7
	Oeste	1,212		
Todos os segmentos	Geral	1,213		

Observa-se que os fatores de calibração variam de forma significativa entre as faixas em análise para as abordagens L e V, melhorando os resultados da função objetivo. Isso mostra que a utilização de mais de um fator de calibração pode ser um recurso útil para transferir o modelo do HSM para outra jurisdição. A abordagem R apresentou dois fatores de calibração próximos, portanto parecido com o modelo calibrado por um único fator de calibração. O fator de calibração tende a ser maior para segmentos entre 500 e 1800 m, onde o volume de tráfego é menor que 2500 veículos por dia, ou na região Oeste do estado do Rio Grande do Sul. Isso mostra que nesses casos o número de acidentes previstos com mortos ou feridos foi maior do que o estimado originalmente para todos os segmentos.

Analisando os gráficos CURE das três abordagens analisadas, através das Figuras 13 e 14, constata-se que somente no primeiro caso (L), com separação em três faixas de Comprimento de Segmento, houve uma melhora na transferibilidade do modelo do HSM, tendo uma menor parte dos segmentos fora do intervalo de dois desvios padrão para o $N_{previsto}$. A separação por faixas de Volume de Tráfego (V) e por Zona do estado (R) apresentaram resultados parecidos, onde não houve uma melhora significativa no gráfico dos resíduos acumulados.



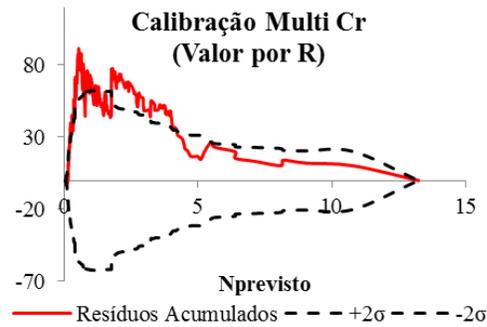


Figura 13: Gráficos CURE de $N_{previsto}$ para os MPAs do HSM calibrados por múltiplos fatores de calibração para 3 variáveis diferentes

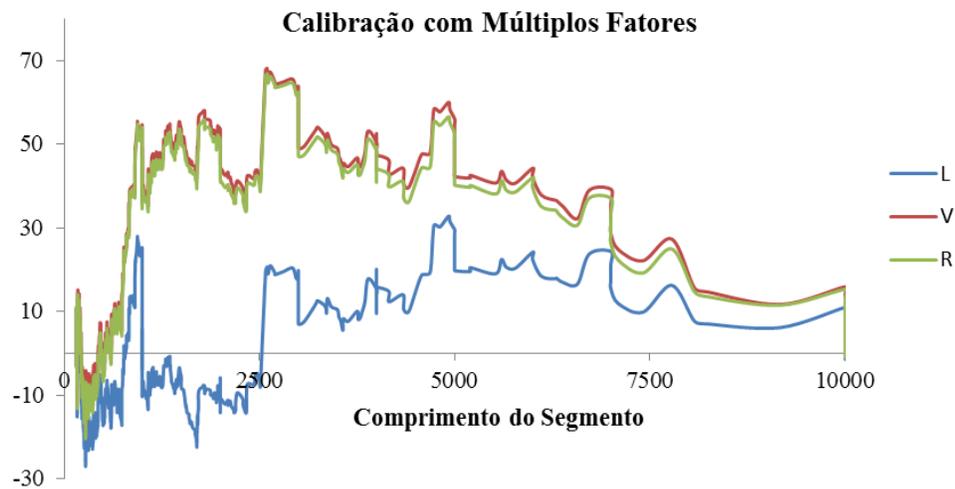


Figura 14: Gráficos CURE dos MPAs do HSM calibrados por Múltiplos fatores de calibração

4.2.3. Função de Calibração

O terceiro método testado para a transferência do modelo do HSM foi a utilização de funções de calibração. Três diferentes funções foram otimizadas por máxima verossimilhança, chegando-se aos modelos e parâmetros indicados na Tabela 24. Percebe-se que a Função de Calibração 3 apresentou melhores resultados, tanto para o valor de ϕ , relacionado a dispersão do modelo, quanto para o valor de $LLnb$, que é o resultado da função objetivo. A Função de Calibração 1 apresentou melhores resultados que a função 2, mesmo possuindo menos parâmetros.

Tabela 24: Funções de calibração utilizadas para calibrar o MPA do HSM

	<i>Função de Calibração</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	ϕ	<i>LLnb</i>
1	$a \times (L \times VDMA \times CMF \times cte)^b$	0,379	0,880	-	-	2,222	-1452,0
2	$a \times (L^b \times VDMA^c \times CMF \times cte)$	0,541	0,926	0,955	-	2,189	-1455,4
3	$a \times (L^b \times VDMA^c \times CMF^d \times cte)$	0,851	0,860	0,909	0,646	2,261	-1448,6

A análise do gráfico CURE das funções de calibração ao longo da variável comprimento do segmento, apresentado na Figura 15, confirma o melhor desempenho da Função de Calibração 3. Os valores acumulados dos resíduos oscilam mais próximos e regularmente em torno do eixo zero do que nas outras funções, o que é desejável.

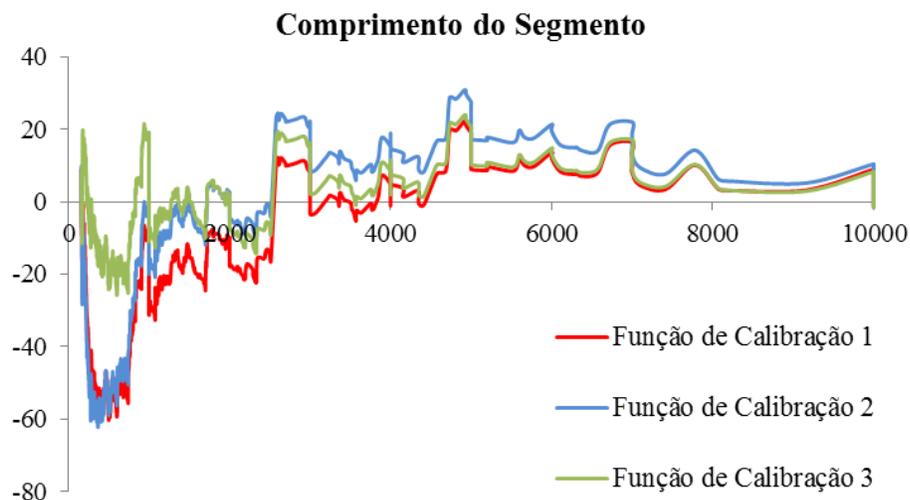
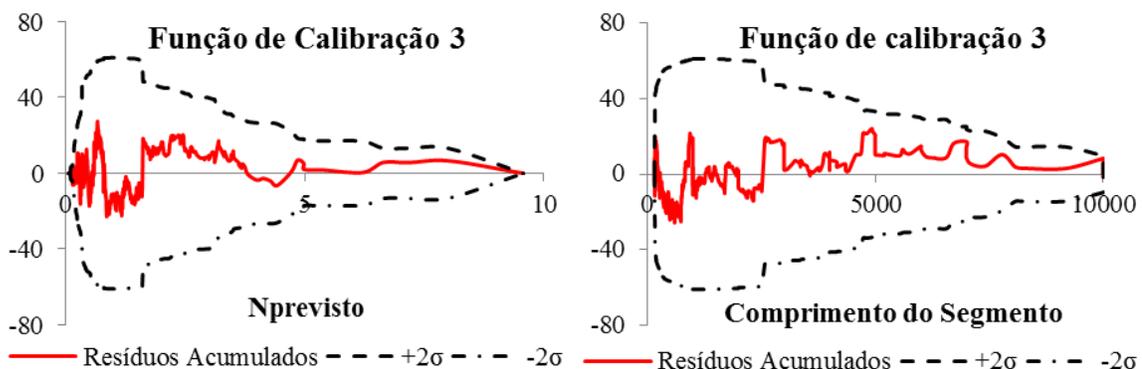


Figura 15: Gráfico CURE dos MPA do HSM calibrado por funções de calibração para o Comprimento do Segmento

Olhando para outras variáveis, na Figura 16, percebe-se que o modelo do HSM permanece dentro do intervalo de dois desvios padrões quando ajustado pela Função de Calibração 3. Quando analisadas as outras funções de calibração 1 e 2, na Figura 17, nota-se um resultado satisfatório para a função 1, ainda que inferior à função 3, além de resultados limitados para a função 2, conforme indicado pelo valor de LLnb na Tabela 24.



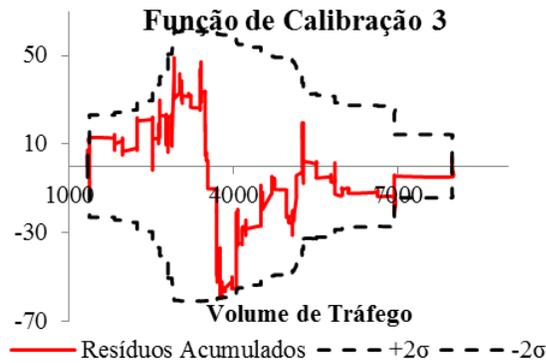


Figura 16: Gráficos CURE de $N_{previsto}$ para o MPA calibrado pela Função de Calibração 3

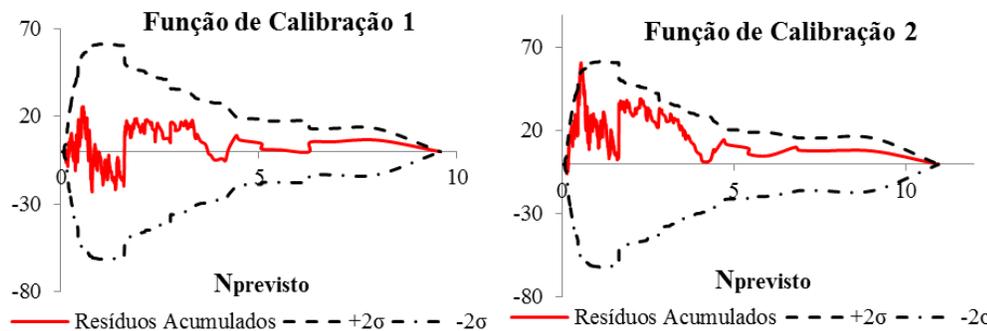


Figura 17: Gráfico CURE de $N_{previsto}$ para o MPA do HSM calibrado pelas funções de calibração 1 e 2

4.3. RESULTADOS DOS MODELOS DESENVOLVIDOS

A etapa do método referente ao desenvolvimento de MPAs foi aplicada à base de dados em estudo, separadamente para as duas metodologias de segmentação apresentadas. Diferentes funções foram testadas para cada uma das variáveis, com o objetivo de representar os dados adequadamente e obter o melhor resultado possível para o gráfico CURE e a maximização da função objetivo. Os modelos estimam o número de acidentes previstos ($N_{previsto}$) com feridos ou mortos para o período de um ano.

Primeiramente, foi realizado um MPA simples (2S) que leva em conta somente duas variáveis, Comprimento do Segmento e Volume de Tráfego. A função potencial obteve os melhores resultados para a variável Comprimento do Segmento (L), sendo representada em quilômetros, enquanto a função exponencial foi utilizada para a variável Volume de Tráfego (VDMA), em veículos por dia. O modelo com os parâmetros utilizados, e os gráficos CURE, para cada segmentação, podem ser observados na Tabela 25 e Figura 18, respectivamente.

Tabela 25: MPA simples e os parâmetros estimados para cada segmentação.

<i>Modelo 2S</i>	<i>Segmentação</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
$\alpha \cdot L^b \cdot e^{\frac{VDMA \cdot c}{1000}}$	Homogênea	0,120	0,739	0,226
	DNIT	0,125	0,804	0,272

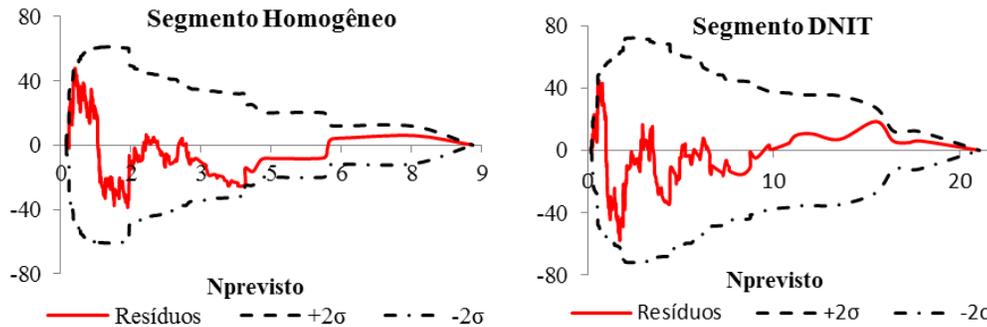


Figura 18: Gráfico CURE para o MPA simples para as duas segmentações

Em seguida, três novas variáveis foram incluídas separadamente ao modelo, gerando três opções de modelo com três variáveis cada, sendo duas dessas as variáveis do modelo simples (Comprimento do Segmento e Volume de Tráfego), representado por 2S. Estas variáveis foram: Densidade de Acessos (A), Raio da Curva Horizontal (R) e Tipo de Terreno (T), onde cada variável é incluída no MPA através de uma função que é multiplicada pelo modelo simples. As variáveis analisadas, juntamente com a sua respectiva abreviatura, função, parâmetro e unidade são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26: MPA simples e os parâmetros para as variáveis T, A e R.

Variável	Abrev.	Função	Observação
Tipo de Terreno	T	T	T assume o valor de 1 se terreno plano; se ondulado, $T=t(o)$; se montanhoso, $T= t(m)$
Densidade de Acessos	A	$\left(1 + \frac{A}{d}\right)$	Número de acessos por quilômetro (km); Parâmetro de ajuste: d
Raio da Curva Horizontal	R	$e^{\left(\frac{f \times R}{(R+1)^2}\right)}$	Raio da curva em metros (m); Parâmetro de ajuste: f

Percebe-se que a função exponencial, utilizada para o Volume de Tráfego e Raio da Curva Horizontal, possuem a característica de que quando o valor assumido para a variável for 0, o seu resultado será 1,00, não importando o valor do parâmetro relacionado. Isso é útil principalmente para a variável Raio da Curva Horizontal, pois, sendo o trecho em análise uma tangente, isto é, se o raio da curva for definido na base de dados como 0 (embora seja infinito), o valor da função passará a ser 1,00. Dessa forma não há a necessidade de adotar uma função

diferente para segmentos em curvas e outra para tangentes. Para o caso do Volume de Tráfego, embora os MPAs tenham sido desenvolvidos para a faixa restrita de valores entre cerca de 600 e 8500 veículos por dia, é improvável que a variável Volume de Tráfego venha a obter um valor próximo de 0.

Por meio da Figura 19 é possível observar o gráfico CURE para cada um dos três modelos com três variáveis mais o modelo com duas variáveis em função do Comprimento do Segmento. Todos eles apresentam o valor dos resíduos acumulados dentro do seu respectivo limite inferior e superior de dois desvios padrão. Quando analisados os modelos com quatro ou cinco variáveis combinadas, verifica-se que os resíduos dos modelos tendem a variar de um modo próximo aos com três variáveis, não havendo melhora significativa nos gráficos CURE.

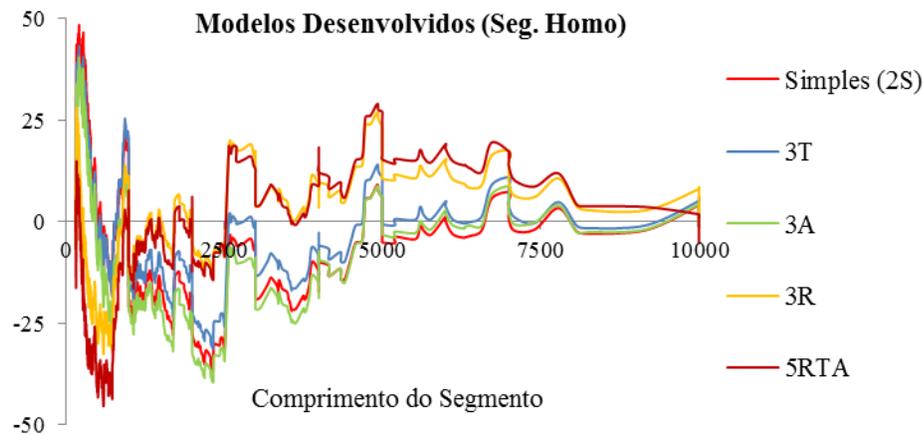


Figura 19: Gráfico CURE dos MPAs com 2 e 3 variáveis para o Comprimento do Segmento

Por fim, foram testadas outras quatro variáveis: Presença de Faixa de Ultrapassagem, Largura da Faixa de Rolamento, Largura do Acostamento e a Porcentagem de Veículos Pesados na composição do tráfego, sendo essa última, apresentada na Tabela 27, a única que resultou em um acréscimo no valor de LLnb.

Tabela 27: MPA simples e os parâmetros para a variável P

Variável	Abrev.	Função	Observação
Porcentagem de Veículos Pesados	P	$\left(1 - \frac{P}{g}\right)$	Proporção de veículos na composição de tráfego ($0 \leq P \leq 1$); Parâmetro de ajuste: g

A combinação das quatro variáveis que resultaram em um acréscimo no valor de LLnb (T, A, R e P) foram utilizadas para gerar modelos com quatro, cinco e seis variáveis, sendo que toda vez que uma variável é adicionada ao MPA, todos os parâmetros devem ser estimados

novamente. Os parâmetros estimados para cada um dos modelos, e para cada segmentação, podem ser observado na Tabela 28. Os modelos podem ser identificados por um código, que inclui um número, que indica quantas variáveis ele possui, e letras, que indicam quais são as variáveis utilizadas além daquelas que possuem o modelo simples. Por exemplo, o código 6ARTP indica um modelo que possui 6 variáveis, as duas variáveis do modelo simples e as variáveis A, R, T e P.

Tabela 28: Valor dos parâmetros estimados para cada MPA

<i>Código</i>	<i>Modelo</i>	<i>Segm.</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>t(o)</i>	<i>t(m)</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
3T	2S · T	Homo.	0,118	0,770	0,220	0,869	1,344	-	-	-
		DNIT	0,120	0,837	0,261	0,889	1,478	-	-	-
3A	2S · A	Homo.	0,0877	0,765	0,248	-	-	9,235	-	-
		DNIT	0,0779	0,837	0,290	-	-	5,166	-	-
3R	2S · R	Homo.	0,109	0,854	0,223	-	-	-	88,05	-
		DNIT	0,0953	0,874	0,249	-	-	-	87,74	-
4AT	2S · A · T	Homo.	0,0831	0,807	0,241	0,939	1,456	8,693	-	-
		DNIT	0,0679	0,892	0,274	1,100	1,677	4,653	-	-
4TR	2S · T · R	Homo.	0,109	0,862	0,220	0,889	1,201	-	80,25	-
		DNIT	0,294	0,886	0,217	0,922	1,172	-	80,82	-
4AR	2S · A · R	Homo.	0,0764	0,890	0,246	-	-	8,276	95,43	-
		DNIT	0,0671	0,895	0,266	-	-	6,882	76,19	-
5ART	2S · A · R · T	Homo.	0,0745	0,908	0,241	0,968	1,294	8,035	86,56	-
		DNIT	0,0635	0,918	0,261	1,010	1,298	6,332	68,94	-
6ARTP	2S · A · R · T · P	Homo.	0,0745	0,908	0,241	0,968	1,294	8,035	86,56	1132
		DNIT	0,0957	0,933	0,247	0,998	1,288	6,230	68,94	1,00

4.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Uma vez que os MPAs foram estimados, tanto para a transferência do modelo do HSM, quanto para o desenvolvimento de novos modelos, torna-se possível comparar os seus desempenhos aplicados às rodovias de pista simples do estado do Rio Grande do Sul. Primeiramente agregou-se para cada um dos 65 SNVs da base de dados, o seu respectivo número de acidentes observados ($N_{\text{observado}}$) para os anos de 2017 a 2019, N_{previsto} (acidentes com feridos ou mortos) para o mesmo período, por segmento, para cada um dos modelos. Um exemplo desta etapa (somente resultados agregados para N_{previsto} pelo modelo do HSM para a BR-116) por ser visto na Tabela 29.

Tabela 29: Agregação do Nprevisto para o modelo HSM calibrado para os SNVs da BR-116 utilizados na base de dados

SNV	Extensão (km)	Núm. de Segmentos	Nobservado	Nprevisto HSM	$\Sigma dif $
116BRS3010	37,26	84	30	38,9	8,9
116BRS3030	16,28	60	41	18,9	22,1
116BRS3050	21,99	86	13	11,6	1,4
116BRS3070	35,64	165	55	46,6	8,4
116BRS3080	26,80	122	50	39,6	10,4
116BRS3110	19,61	93	66	48,9	17,1
116BRS3130	12,04	53	24	23,4	0,6
116BRS3150	10,84	51	26	31,1	5,1
Total	180,45	714	305	259,0	74,0

A partir da informação agregada por do Nprevisto SNV foram estimadas as medidas de qualidade de ajuste presentes na (Seção 3.2.4) para cada um dos modelos disponíveis, com a exceção dos valores de ϕ e LLnb que foram obtidos por meio da maximização da função objetivo. Os resultados dos testes permitem comparar os diferentes métodos de transferência do MPA do HSM, mais os nove MPAs desenvolvidos (segmentação homogênea) e são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Comparação entre os MPAs transferidos e desenvolvidos

Tipo	Modelo	Nprevisto	R ²	MAPE	$\Sigma dif $	$\Sigma dif ^2$	ϕ	LLnb
Transferência do Modelo do HSM	HSM	1182	0,588	36,4%	522,1	7491,3	1,859	-1504,8
	HSM Calibrado	1434	0,588	34,6%	496,7	7072,8	2,174	-1458,7
	Multi Calib (L)	1434	0,591	34,8%	498,7	6972,9	2,205	-1453,6
	Função Calib. 1	1434	0,599	35,1%	503,7	6867,6	2,222	-1452,0
	Função Calib. 2	1434	0,601	35,3%	505,6	7033,0	2,189	-1455,4
	Função Calib. 3	1434	0,577	35,0%	502,5	6986,5	2,261	-1448,6
Modelos Desenvolvidos	2S	1434	0,526	37,3%	535,5	7954,2	2,083	-1466,3
	3R	1434	0,651	32,6%	467,7	5728,4	2,338	-1444,4
	3A	1434	0,543	36,7%	526,0	7551,3	2,277	-1437,1
	3T	1434	0,561	35,3%	505,6	7226,3	2,162	-1458,3
	4RT	1434	0,658	31,7%	454,5	5583,0	2,379	-1440,8
	4AT	1434	0,581	34,6%	496,6	6770,6	2,372	-1427,2
	4AR	1434	0,657	32,9%	472,3	5694,3	2,571	-1410,5
	5ART	1434	0,666	31,4%	449,7	5486,8	2,629	-1406,1
	6ART%	1434	0,666	31,4%	449,7	5486,7	2,629	-1406,1

Na parte superior da Tabela 30 são apresentados os resultados para a transferência do modelo do HSM, enquanto os resultados dos modelos se encontram na parte inferior. As células

marcadas em verde mostram os modelos (linha) que apresentaram os melhores resultados para o indicador (coluna), já as células marcadas em vermelho indicam os modelos que apresentaram os piores resultados.

É possível comparar os gráficos CURE dos MPAs de acordo com as duas abordagens, mediante a Figura 20, para a variável Comprimento do Segmento. Nesta é percebido o desempenho de três tipos de transferência do modelo do HSM: a calibração por fator único, calibração por faixas de comprimento de segmento e a Função de Calibração 3, bem como os modelos desenvolvidos com menor e maior LLnb, os modelos 2S e 5RTA, respectivamente.

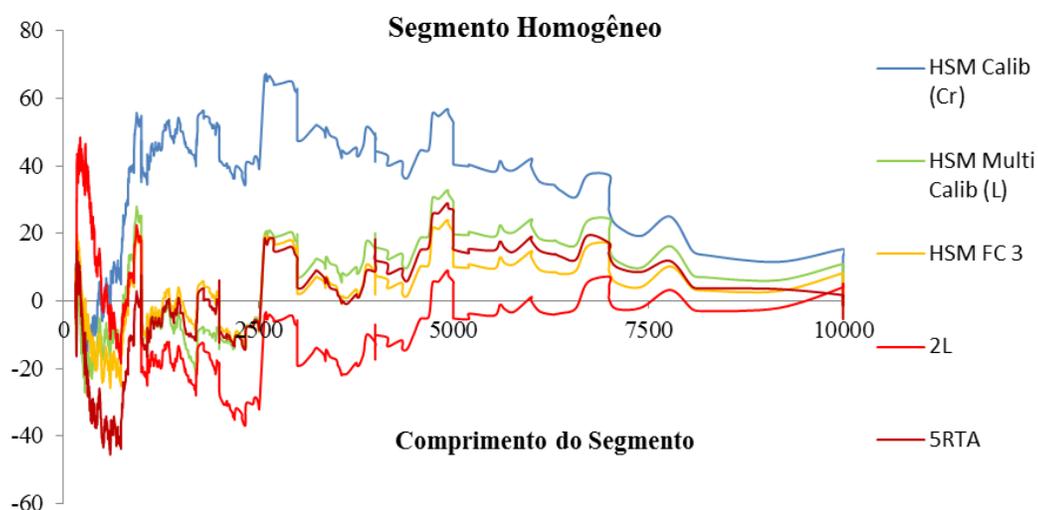


Figura 20: Gráfico CURE para cinco MPAs em função do Comprimento do Segmento

Através da Figura 21 é possível comparar os dois modelos que obtiveram as melhores estimativas de LLnb em cada abordagem. Do lado esquerdo, o gráfico CURE da transferência do modelo do HSM mediante a Função de Calibração 3. Do lado direito o gráfico CURE do modelo desenvolvido 5ART.

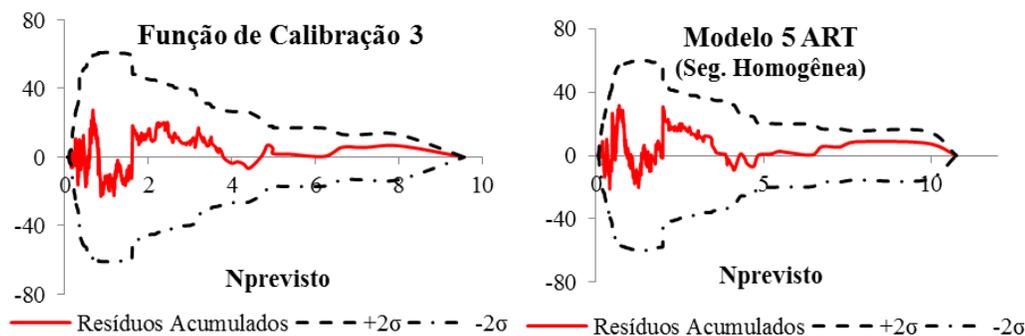


Figura 21: Gráfico CURE para o MPA transferido pela Função de Calibração 3 (à esquerda) e pelo modelo 5ART (à direita), em função de Nprevisto

Além da comparação entre as duas abordagens, é necessário entender a diferença entre o desempenho dos modelos desenvolvidos aplicados para cada uma das duas segmentações utilizadas. A Figura 18, juntamente com a Tabela 31 permite comparar os resultados dos indicadores de desempenho dos modelos desenvolvidos pelos dois tipos de segmentação. O resultado de LLnb, diferente dos outros testes analisados, não é comparável entre as segmentações, visto que a maximização da função objetivo é resultado da soma de um número diferente de segmentos.

Tabela 31: Comparação dos resultados por segmentação

	Modelo	Nprevisto	R ²	MAPE	Σ dif	Σ dif ²	φ	LLnb
Segmentação Homogênea	2S	1434	0,526	37,3%	535,5	7954,2	2,083	-1466,3
	3R	1434	0,651	32,6%	467,7	5728,4	2,338	-1444,4
	3A	1434	0,543	36,7%	526,0	7551,3	2,277	-1437,1
	3T	1434	0,561	35,3%	505,6	7226,3	2,162	-1458,3
	4RT	1434	0,658	31,7%	454,5	5583,0	2,379	-1440,8
	4AT	1434	0,581	34,6%	496,6	6770,6	2,372	-1427,2
	4AR	1434	0,657	32,9%	472,3	5694,3	2,571	-1410,5
	5ART	1434	0,666	31,4%	449,7	5486,8	2,629	-1406,1
	6ART%	1434	0,666	31,4%	449,7	5486,7	2,629	-1406,1
Segmentação DNIT	2S	1443	0,397	41,7%	601,8	10860,2	0,942	300,6
	3R	1443	0,426	39,9%	575,8	9875,7	0,993	308,5
	3A	1443	0,447	38,8%	559,7	9488,9	1,155	332,1
	3T	1443	0,642	32,9%	474,9	5970,2	1,247	343,3
	4RT	1443	0,484	36,4%	525,3	8424,9	1,242	343,9
	4AT	1443	0,675	31,2%	450,6	5668,1	1,265	345,3
	4AR	1443	0,633	31,4%	453,4	6060,6	1,468	366,9
	5ART	1443	0,634	31,4%	453,6	5975,7	1,507	369,8
	6ART%	1443	0,651	31,1%	448,9	5690,5	1,534	372,6

4.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como resultado deste trabalho, 28 MPAs foram aplicados à base de dados do estudo, sendo destes: 8 experimentos de transferência do modelo do HSM para a segmentação homogênea, 9 modelos desenvolvidos adotando a segmentação homogênea e 9 adotando a segmentação gerada pelos dados do DNIT. Analisando a comparação dos resultados de cada um destes modelos, bem como o seu processo de obtenção, é possível compreender melhor os aspectos negativos e positivos das duas abordagens.

- **Coleta de dados**

A recente disponibilidade massiva de dados em abrangência nacional permite explorar de um modo profundo e uniforme os MPAs no país. O registro dos acidentes em coordenadas de Latitude e Longitude pela PRF começou em 2016, havendo registros de anos completos somente a partir de 2017. O PNCT e os dados do Programa BR-Legal são do mesmo modo, bases de dados disponíveis há pouco tempo. Essas bases, juntamente com *softwares* como: o ROCA, Google Earth, Google Street e outros, permitem realizar estudos que não eram possíveis em 2010, quando a AASHTO introduziu o HSM.

Ainda assim, o modelo do HSM possui uma grande quantidade de dados necessários para sua utilização que não são de simples coleta e organização. O modelo para segmentos rurais de pista simples possui 12 CMFs, cada um necessita de algum dado diferente para a sua aplicação. A complexidade da coleta e organização destes dados faz com que os modelos, ou não sejam utilizados, ou venham a ser utilizados sem diversos dados considerados como desejáveis. Por esta razão, a ideia da obtenção de um modelo alternativo que necessite de menos dados do que os modelos do HSM e seja menos complexo vem a se tornar interessante.

Os modelos desenvolvidos nesta dissertação partiram das informações já utilizadas para a transferência do modelo do HSM, com exceção da porcentagem de veículos pesados na composição de tráfego. Eles variam de 2 a 6 variáveis, podendo ser utilizados de acordo com a disponibilidade de dados do interessado na sua utilização. Para o cenário brasileiro, esta é uma característica importante, pois como disse Hauer, “nunca se sabe em que condições um modelo será usado” (Hauer, 2015). Somente os dados obrigatórios para o modelo do HSM, sem os quais o modelo não pode ser usado, são 8. Uma coleta de dados simplificada pode tornar o MPA menos ‘assustador’ e facilitar a sua aceitação e disseminação entre os planejadores de transporte.

É certo, porém, analisando a comparação dos resultados, que o número e o tipo de variável influenciam diretamente o modelo. A variável que parece mais influenciar os modelos desenvolvidos é o Raio da curva horizontal, além daquelas presentes no modelo simples. Essa variável, porém, não é de difícil obtenção. A variável Raio da curva horizontal, juntamente com o desenvolvimento da curva horizontal (não utilizada no modelo por razão da modelagem) é acessível por meio da ferramenta ROCA, ou outra equivalente. A variável tipo de terreno está

presente nos relatórios do BR-Legal, juntamente com a densidade de acessos, que ainda pode ser confirmada pelo Google Street, Google Earth, ou similar.

- **Transferência do Modelo do HSM**

Observa-se que a aplicação direta do modelo do HSM resultou na previsão de menos acidentes do que o observado, contrariando os resultados dos trabalhos revisados realizados no Brasil. Isso pode ser explicado pelas características do DAT adotado em 2016, que desde então deixou de registrar muitos acidentes ocorridos que apresentaram baixa severidade. O fator de calibração obtido confirma isto, considerando todos os tipos de acidentes, observa-se um Cr igual a 0,591. Enquanto que ao analisarmos o Cr para acidentes com alta severidade, encontra-se 1,213 para acidentes com feridos ou mortos. Esse resultado demonstra a necessidade de cautela no uso do banco de dados da PRF, principalmente para a utilização de modelos que avaliem acidentes com baixa severidade. Por esse motivo, desse ponto em diante, o trabalho se manteve atento estritamente aos acidentes com feridos ou mortos.

O fator de calibração em si, não é uma medida de desempenho do modelo. Analisando porém os gráficos CURE do modelo transferido por um único fator de calibração para 3 diferentes variáveis (Figura 12), percebe-se que os resultados encontrados no modelo não foram satisfatórios. Com o objetivo de melhorar a transferibilidade do modelo do HSM, foram utilizados dois métodos de calibração, a utilização de múltiplos fatores de calibração e funções de calibração. A única adoção de fatores de calibração que efetivamente melhorou a transferibilidade do modelo do HSM foi a separação da variável Comprimento do Segmento (L) em 3 faixas de valores, semelhante ao encontrado por Srinivasan *et al.* (2016), conforme percebido pelos gráficos CURE presentes nas Figuras 13 e 14. A separação do Volume de Tráfego (V) em 3 diferentes faixas de valores resultou em uma melhora tímida, enquanto que os fatores de calibração determinados para as regiões leste e oeste do estado obtiveram valores muito próximos, não alterando o valor de LLnb obtido pela calibração com fator único.

As três funções de calibração resultaram em uma melhor transferibilidade em relação ao método de múltiplos fatores de calibração, com destaque para a Função de Calibração 3, que utilizando 4 parâmetros obteve os melhores resultados para os gráficos CURE e para a maioria das medidas de desempenho. A função com 2 parâmetros obteve melhores resultados que a com

3 parâmetros, indicando que não necessariamente uma maior utilização de parâmetros reflete em melhora para o modelo.

- **Modelos desenvolvidos**

Os modelos foram desenvolvidos de acordo com a perspectiva de utilização prática, para isto, o foco da modelagem do estudo foi dado à maximização da função objetivo, e não a obtenção dos parâmetros ou o tipo de função utilizada no modelo, ou seja, o objetivo é obter os maiores resultados possíveis de LLnb. Não é claro, por isso, se as variáveis utilizadas para melhorar a performance do modelo estão ali por representarem a condição da segurança das rodovias, ou se estão como substitutas (*proxy*) de outras variáveis ausentes no modelo.

O gráfico CURE presente na Figura 18 mostra que o MPA simples apresentou resultados satisfatórios para as duas segmentações utilizadas, sendo possível com apenas duas variáveis obter estimativas da frequência média esperada de acidentes com feridos ou mortos para segmentos rodoviários de pista simple para o estado do Rio Grande do Sul. Ainda que os testes do modelo 2S apresentem resultados limitados, comparados aos outros modelos, há a possibilidade de realizar estudos práticos mesmo quando não houver outra variável disponível para incluir no modelo.

À medida que mais variáveis são incluídas no modelo simples, maior é o resultado de LLnb, e apesar do aumento da complexidade, o valor de AIC diminui. Os modelos com três variáveis mostram gráficos CURE satisfatórios, sempre alterando em torno de zero dentro do intervalo de dois desvios padrões, similar ao modelo simples, conforme Figura 19. Durante esse processo, o valor de ϕ também se manteve em alta, indicando uma menor variância dos valores previstos e uma menor sobredispersão. Em relação à segmentação homogênea, verifica-se que o acréscimo do raio da curva horizontal resulta em uma melhora significativa nos valores de todos os testes, sendo superada somente no valor de LLnb pela introdução da variável Densidade de Acessos. Já a introdução do Tipo de Terreno não resulta em uma melhora tão positiva em nenhum dos testes, gerando mais impacto no modelo quando adicionado junto às outras duas variáveis.

Percebe-se que modelo obtém melhor desempenho conforme as variáveis são combinadas, tendo os modelos de 4 variáveis melhor desempenho que os de 3, e sendo o modelo com 5 variáveis o que possui os melhores resultados em todos os testes. O modelo com 6

variáveis, contando com a variável Porcentagem de veículos pesados na composição do Tráfego, não apresentou nenhum ganho na segmentação homogênea, obtendo um parâmetro g que o invalida no modelo, conforme indicam os parâmetros da Tabela 28.

Quando analisada a segmentação pela base de dados do DNIT, observa-se uma reação diferente do modelo ao ingresso de cada variável. Neste, diferentemente do ocorrido com uso da segmentação homogênea, a inclusão da variável Tipo de Terreno produz os melhores resultados. Isso pode ser explicado pelo fato de esta segmentação possuir segmentos maiores, contendo mais de uma curva horizontal e tangentes, e dissolver o número de acessos nele registrados, havendo assim uma perda de informações dentro do segmento. Nesta segmentação, os modelos com 4 ou mais variáveis também apresentam melhores resultados, destacando-se o modelo com 6 variáveis, que é superior ao de 5, sendo influenciado pela variável Porcentagem de veículos pesados na composição de tráfego.

Os modelos foram desenvolvidos a partir de dados de acidentes do estado do Rio Grande do Sul registrados nos anos de 2017 a 2019. Para estudos realizados para períodos posteriores a esse ou fora desta jurisdição, o MPA pode ter seus parâmetros estimados novamente ou ser calibrado por meio do parâmetro a , que funciona como um multiplicador geral do modelo.

- **Síntese da Discussão**

Os resultados dos testes, presentes na Tabela 30, permitem comparar o desempenho das duas abordagens estudadas. Nota-se a aplicação direta do modelo para rodovias de pista simples proposto no HSM apresentou os piores resultados entre todas alternativas testadas nesse estudo, para a maioria dos testes, especialmente o valor de ϕ e LL_{nb} , visto que estes os seus parâmetros não são determinados pela maximização destes. A calibração do modelo do HSM pelo fator único, conforme orientado pelo manual, resultou em uma melhora nas medidas de desempenho com um fator de calibração único, porém com resultados insatisfatórios para os gráficos CURE. Constata-se que apesar de o modelo do HSM ser o mais difundido, a sua aplicação direta, e mesmo a calibração orientada pelo mesmo, utilizando um único fator de calibração, não resultaram em uma calibração satisfatória.

Os diferentes métodos aplicados à transferência do modelo do HSM, registrados na Tabela 30, foram capazes de gerar bons gráficos CURE, contudo, geraram uma melhora tímida nas outras medidas de desempenho. Conforme encontrado por Srinivasan *et al.* (2016), a

utilização de fatores de calibração para diferentes faixas de Comprimento de Tráfego apresentou os melhores resultados. Uma melhor transferibilidade do modelo é possível através da utilização de funções de calibração. Porém, conforme também encontrado por Claros *et al.* (2018), as funções de calibração não tiveram melhora significativa na precisão em comparação aos fatores de calibração por faixas. Esses métodos, entretanto, introduzem complexidade em um modelo que já possui uma utilização complexa. São necessários esforços metodológicos adicionais que se aproximam do desenvolvimento de um novo modelo, como a utilização de uma função objetivo, como a maximização da verossimilhança por uma função binomial negativa, comum em MPAs.

O desenvolvimento do modelo simples (2S) somente apresentou melhores resultados de ϕ e LLnb que a transferência direta do modelo do HSM, sendo ultrapassado por todos os outros em todas as medidas de desempenho. Ainda assim, os gráficos CURE mostraram que ele é capaz de lidar satisfatoriamente com os resíduos acumulados. Esses resultados são positivos, pois mesmo que o modelo simples encontrado não seja ideal, por meio de desenvolver MPAs para a jurisdição de interesse com apenas duas variáveis, Comprimento do Segmento e Volume de Tráfego, é possível ter resultados comparáveis aos do modelo do HSM calibrado (Claros *et al.*, 2018). Com relação ao modelo simples aplicado à segmentação do DNIT, percebe-se por meio da Figura 18 que o gráfico CURE também apresenta os seus resíduos acumulados dentro do intervalo de dois desvios padrão, e, ainda que os outros testes tenham mostrado resultados limitados, ele pode ser utilizado com cautela.

Além disso, assim que uma terceira variável é introduzida no modelo, este passa a ter um desempenho superior, comparável ao dos métodos alternativos para a transferência do modelo do HSM. Os modelos com 4 e 5 variáveis apresentam desempenho superior aos outros modelos nos testes da Tabela 30, mesmo utilizando um número menor de variáveis. Por isso, o desenvolvimento de novos modelos através do passo a passo demonstrado neste trabalho é uma alternativa viável e atrativa para ter um modelo disponível para aplicações práticas no contexto brasileiro. Produzido a partir dos dados da jurisdição em estudo, o MPA desenvolvido pode apresentar resultados comparáveis aos da transferência do modelo do HSM, sendo ainda de simples utilização, pois pode possuir um número reduzido de variáveis, sendo estas próximas daquelas disponíveis no contexto nacional, e por isso de simples coleta e introdução no modelo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Os Modelos de Previsão de Acidentes estão entre os temas mais estudados em Segurança Viária, sendo a peça chave do Manual de Segurança Viária de 2010, o HSM. Contudo, a sua utilização tem sido pouco explorada no contexto nacional, devido a complexidade do tema e a falta de dados no contexto nacional. Porém, devido a recentes avanços na coleta de dados no Brasil, como o registro de acidentes da PRF em coordenadas Geográficas, o Plano Nacional de Contagem de Tráfego e o Programa BR-Legal, um extenso banco de dados foi disponibilizado, possibilitando a utilização dos modelos para aplicações práticas em todo o país.

Esta dissertação buscou comparar duas diferentes abordagens para a obtenção de MPAs para rodovias rurais de pista simples para o estado do Rio Grande do Sul. A primeira abordagem é a transferência do modelo mais difundido na literatura, o do HSM, desenvolvido para rodovias dos Estados Unidos, através de diferentes métodos, buscando o melhor ajuste aos dados possível. A segunda abordagem foi o desenvolvimento de novos modelos a partir dos dados de rodovias e acidentes da base de dados local.

Primeiramente foi feita a organização e consolidação de 1723,47 quilômetros de segmentos rodoviários de pista simples, para então fazer o processo de segmentação de dois modos diferentes. Para a segmentação homogênea, transferiu-se o modelo do HSM por meio de três métodos: transferência direta, fatores de calibração e a função de calibração. Conforme esperado, a transferência direta não obteve bons resultados, todavia, os métodos de calibração do modelo possibilitaram um melhor ajuste do modelo aos dados. Nove MPAs diferentes foram desenvolvidos, podendo ser utilizados pelos dois tipos de segmentação. Os nove modelos são uma combinação do modelo simples, que possui duas variáveis, mais a combinação com outras quatro variáveis. A medida que essas variáveis são introduzidas no modelo, ele passa a obter melhores resultados, dependendo da medida de desempenho analisada.

Comparando as duas abordagens pelo processo e os seus respectivos resultados, vê-se que para a etapa de coleta de dados, a transferência do modelo do HSM vem a ser mais trabalhosa, podendo ser um limitador, uma vez que requer um vasto banco de dados, com diversas variáveis a serem coletadas para a utilização dos *Crash Modification Factors* (CMFs). Nesse ponto o

desenvolvimento de um modelo torna-se mais vantajoso, uma vez que ele pode, utilizando três variáveis obter um desempenho superior à transferência do modelo do HSM. Quando analisados os resultados das medidas de desempenho, percebe-se que todos os modelos desenvolvidos obtiveram gráficos CURE satisfatórios, o que não ocorre para todas as tentativas de transferência do modelo do HSM.

Quando comparados os dois tipos de segmentação, percebe-se que a segmentação homogênea apresenta resultados consideravelmente superiores. No entanto, a segmentação gerada pelos dados DNIT tem a seu favor o fato de já estar disponível em toda malha, através dos dados do programa BR-LEGAL, apresentando gráficos CURE satisfatórios para as variáveis analisadas.

Sendo assim, constata-se que apesar de o modelo do HSM ser o mais difundido, a sua aplicação direta, e mesmo a sua calibração com um único fator de calibração, orientada pelo manual, não resultam em uma calibração satisfatória. Uma melhor a transferibilidade do modelo é possível através de métodos alternativos, como a função de calibração. O desenvolvimento de novos modelos através do passo a passo demonstrado neste trabalho é uma alternativa viável, podendo apresentar resultados superiores ao da transferência do modelo do HSM e sendo de mais simples utilização, pois possui um número muito menor de variáveis a serem coletadas e introduzidas no modelo.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos a partir desta dissertação podem ser citados:

- a transferência dos MPAs aqui desenvolvidos para outras jurisdições dentro do Brasil, a partir da mesma base de dados e procedimentos metodológicos, principalmente estados próximos ou com características semelhantes;
- Utilizar os mesmos procedimentos metodológicos e com a mesma base de dados de diferentes estados e então avaliar a sua transferibilidade, conforme fez Fahid *et al.* (2018b);
- Desenvolver MPAs para outros elementos rodoviários, como segmentos de pista dupla, *Freeways* e seus componentes (rampas de acesso, interconexões, etc) e interseções;

- Realizar uma análise da rede de rodovias rurais de pista simples do estado do Rio Grande do Sul para determinar os segmentos viários mais críticos (*network screening*).

REFERÊNCIAS

AASTHO (2010) *Highway safety manual*. (1st ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO (2014). *Highway Safety Manual Supplement*. (1st ed.). American Association of Highways and Transportation Officials. Washington DC.

Alluri, P., Saha, D., e Gan, A. (2014) Minimum sample sizes for estimating reliable *Highway Safety Manual (HSM)* calibration factors. *Journal of Transportation Safety & Security*, 8(1), 56–74. doi:[10.1080/19439962.2014.978963](https://doi.org/10.1080/19439962.2014.978963)

Ambros, J., e Sedoník, J. (2016) A Feasibility Study for Developing a Transferable Accident Prediction Model for Czech Regions. *Transportation Research Procedia*, 14, 2054–2063. doi:[10.1016/j.trpro.2016.05.103](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.103)

Ambros, J., Jurewicz, C., Turner, S., e Kieć, M. (2018) An international review of challenges and opportunities in development and use of crash prediction models. *European Transport Research Review*, 10(2), 35. doi:[10.1186/s12544-018-0307-7](https://doi.org/10.1186/s12544-018-0307-7)

Ambros, J., Turek, R., Brich, M., e Kubeček, J. (2019) Safety assessment of Czech motorways and national roads. *European Transport Research Review*, 11(1), 1. doi:[10.1186/s12544-018-0328-2](https://doi.org/10.1186/s12544-018-0328-2)

Asal, H. I., e Said, D. G. (2019) An Approach for Development of Local Safety Performance Functions for Multi-Lane Rural Divided Highways in Egypt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 036119811984991. doi:[10.1177/0361198119849914](https://doi.org/10.1177/0361198119849914)

Bíl, M., Andrášik, R., Sedoník, J., e Cícha, V. (2018) ROCA – An ArcGIS toolbox for road alignment identification and horizontal curve radii computation. *PLOS ONE*, 13(12), e0208407. doi:[10.1371/journal.pone.0208407](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208407)

Brimley, B. K., Saito, M., e Schultz, G. G. (2012) Calibration of Highway Safety Manual Safety Performance Function: Development of New Models for Rural Two-Lane Two-Way Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2279(1), 82–89. doi:[10.3141/2279-10](https://doi.org/10.3141/2279-10)

Cafiso, S., D'Agostino, C., e Persaud, B. (2018) Investigating the influence of segmentation in estimating safety performance functions for roadway sections. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(2), 129–136. doi:[10.1016/j.jtte.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.10.001)

Claros, B., Sun, C., e Edara, P. (2018) HSM calibration factor, calibration function, or jurisdiction-specific safety model – A comparative analysis. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1–20. doi:[10.1080/19439962.2018.1477896](https://doi.org/10.1080/19439962.2018.1477896)

CNT (2019). Relatório Gerencial – *Pesquisa Rodoviária 2019*. Confederação Nacional do Transporte (CNT).

Cunto, F., Sobreira, L., e Ferreira, S. (2015) Assessing the Transferability of the Highway Safety Manual Predictive Method for Urban Roads in Fortaleza City, Brazil. *Journal of Transportation Engineering*, 141(1), 04014072. doi:[10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000734](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000734)

Dhahir, B., e Hassan, Y. (2019) Probabilistic, safety-explicit design of horizontal curves on two-lane rural highways based on reliability analysis of naturalistic driving data. *Accident Analysis & Prevention*, 123, 200–210. doi:[10.1016/j.aap.2018.11.024](https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.11.024)

DPRF (2020a) Acidentes. Departamento De Polícia Rodoviária Federal. Obtido 1 de fevereiro de 2020, de <https://portal.prf.gov.br/dados-abertos-acidentes>

DPRF (2020b) Declaração de Acidente de Trânsito (DAT). Departamento De Polícia Rodoviária Federal. Obtido 18 de janeiro de 2021, de <https://portal.prf.gov.br/atendimento-a-acidentes/paginas-anteriores/declaracao-de-acidente-de-transito-dat>

DNIT (2013) *Especificações Técnicas Programa BR-LEGAL*, Coordenação-Geral de Operações Rodoviárias, Diretoria de Infraestrutura Rodoviária, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2015) Guia Prático: Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária – BR-LEGAL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Obtido 10 de fevereiro de 2020, de <http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviarias/programa-br-legal>

DNIT. (2020) *Plano Nacional de Contagem de Tráfego*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Obtido 10 de fevereiro de 2020, de <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem>

Elvik, R. (Ed). (2009) *The handbook of road safety measures*. (2nd ed.). Emerald, Bingley, UK.

Elvik, R. (2011) Assessing causality in multivariate accident models. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 253–264. doi:[10.1016/j.aap.2010.08.018](https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.08.018)

Elvik, R., Ulstein, H., Wifstad, K., Syrstad, R. S., Seeberg, A. R., Gulbrandsen, M. U., e Welde, M. (2017) An Empirical Bayes before-after evaluation of road safety effects of a new motorway in Norway. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 285–296. doi:[10.1016/j.aap.2017.09.014](https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.09.014)

Farid, A., Abdel-Aty, M., e Lee, J. (2018a) A new approach for calibrating safety performance functions. *Accident Analysis & Prevention*, 119, 188–194. doi:[10.1016/j.aap.2018.07.023](https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.023)

Farid, A., Abdel-Aty, M., e Lee, J. (2018b) Transferring and calibrating safety performance functions among multiple States. *Accident Analysis & Prevention*, 117, 276–287. doi:[10.1016/j.aap.2018.04.024](https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.04.024)

Farid, A., Abdel-Aty, M., e Lee, J. (2019) Comparative analysis of multiple techniques for developing and transferring safety performance functions. *Accident Analysis & Prevention*, 122, 85–98. doi:[10.1016/j.aap.2018.09.024](https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.09.024)

Gaweesh, S. M., e Ahmed, M. M. (2019) Evaluating the safety effectiveness of a weather-based variable speed limit for a rural mountainous freeway in Wyoming. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1–26. doi:[10.1080/19439962.2019.1583707](https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1583707)

Ghadi, M. Q., e Török, Á. (2019) Comparison of Different Road Segmentation Methods. *PROMET - Traffic & Transportation*, 31(2), 163–172. doi:[10.7307/ptt.v31i2.2937](https://doi.org/10.7307/ptt.v31i2.2937)

Gomes, M. M., Pirdavani, A., Brijs, T., e Souza Pitombo, C. (2019) Assessing the impacts of enriched information on crash prediction performance. *Accident Analysis & Prevention*, 122, 162–171. doi:[10.1016/j.aap.2018.10.004](https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.10.004)

Hauer, E. (1997) *Observational before--after studies in road safety: estimating the effect of highway and traffic engineering measures on road safety*. (1st ed.). Pergamon, Oxford, OX, U.K. ; Tarrytown, N.Y., U.S.A.

Hauer, E. (2001) Overdispersion in modelling accidents on road sections and in Empirical Bayes estimation, 33, 799–808. doi:[10.1016/S0001-4575\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00094-4)

Hauer, E. (2010) Cause, effect and regression in road safety: A case study. *Accident Analysis & Prevention*, 42(4), 1128–1135. doi:[10.1016/j.aap.2009.12.027](https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.12.027)

Hauer, E. (2015) *The art of regression modeling in road safety*. Springer, New York.

Heydari, S., Miranda-Moreno, L. F., Lord, D., e Fu, L. (2014) Bayesian methodology to estimate and update safety performance functions under limited data conditions: A sensitivity analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 64, 41–51. doi:[10.1016/j.aap.2013.11.001](https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.11.001)

Intini, P., Berloco, N., Binetti, R., Fonzone, A., Ranieri, V., e Colonna, P. (2019) Transferred versus local Safety Performance Functions: A geographical analysis considering two European case studies. *Safety Science*, 120, 906–921. doi:[10.1016/j.ssci.2019.08.013](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.08.013)

Jurewicz C, Steinmetz L, Turner B (2014) Australian National Risk Assessment Model. Publication AP-R451–14. Austroads, Sydney

Kaaf, K. A., e Abdel-Aty, M. (2015) Transferability and Calibration of Highway Safety Manual Performance Functions and Development of New Models for Urban Four-Lane Divided Roads in Riyadh, Saudi Arabia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2515(1), 70–77. doi:[10.3141/2515-10](https://doi.org/10.3141/2515-10)

Li, L., Gayah, V. V., e Donnell, E. T. (2017) Development of regionalized SPFs for two-lane rural roads in Pennsylvania. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 343–353. doi:[10.1016/j.aap.2017.08.035](https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.08.035)

Lima, Tamires Feitosa de *et al.* ANÁLISE EPIDEMIOLÓGICA DOS ACIDENTES DE TRÂNSITO NO BRASIL. *Encontro de Extensão, Docência e Iniciação Científica (EEDIC)*, [S.l.], v. 5, n. 1, mar. 2019. ISSN 2446-6042. Disponível em: <<http://publicacoesacademicas.unicatolicaquixada.edu.br/index.php/eedic/article/view/3102>>.

Acesso em: 29 Abril de 2020.

Lu, J., Haleem, K., Alluri, P., Gan, A., e Liu, K. (2014) Developing local safety performance functions versus calculating calibration factors for SafetyAnalyst applications: A Florida case study. *Safety Science*, 65, 93–105. doi:[10.1016/j.ssci.2014.01.004](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.01.004)

Matarage, I. C., e Dissanayake, S. (2019) Calibration of highway safety manual predictive models for Kansas freeway segments. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 26(3), 251–259. doi:[10.1080/17457300.2019.1621351](https://doi.org/10.1080/17457300.2019.1621351)

Matarage, I. C., e Dissanayake, S. (2020) Quality assessment between calibrated highway safety manual safety performance functions and calibration functions for predicting crashes on freeway facilities. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(1), 76–87. doi:[10.1016/j.jtte.2019.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.12.001)

Mehta, G., e Lou, Y. (2013) Calibration and Development of Safety Performance Functions for Alabama: Two-Lane, Two-Way Rural Roads and Four-Lane Divided Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2398(1), 75–82. doi:[10.3141/2398-09](https://doi.org/10.3141/2398-09)

Moraldi, F., La Torre, F., e Ruhl, S. (2019) Transfer of the *Highway Safety Manual* predictive method to German rural two-lane, two-way roads. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1–20. doi:[10.1080/19439962.2019.1571546](https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1571546)

Persaud, B., e Lyon, C. (2007) Empirical Bayes before–after safety studies: Lessons learned from two decades of experience and future directions. *Accident Analysis & Prevention*, 39(3), 546–555. doi:[10.1016/j.aap.2006.09.009](https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.09.009)

Qin, X., Rahman Shaon, M. R., e Chen, Z. (2016) Developing Analytical Procedures for Calibrating the *Highway Safety Manual* Predictive Methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2583(1), 91–98. doi:[10.3141/2583-12](https://doi.org/10.3141/2583-12)

Rusli, R., Haque, Md. M., Afghari, A. P., e King, M. (2018) Applying a random parameters Negative Binomial Lindley model to examine multi-vehicle crashes along rural mountainous highways in Malaysia. *Accident Analysis & Prevention*, 119, 80–90. doi:[10.1016/j.aap.2018.07.006](https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.006)

Russo, F., Busiello, M., Biancardo, S. A., e Dell’Acqua, G. (2014) Assessing Transferability of Highway Safety Manual Crash Prediction Models to Data from Italy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2433(1), 129–135. doi:[10.3141/2433-15](https://doi.org/10.3141/2433-15)

Russo, F., Busiello, M., e Dell'Acqua, G. (2016) Safety performance functions for crash severity on undivided rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 75–91. doi:[10.1016/j.aap.2016.04.016](https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.016)

Sacchi, E., Persaud, B., e Bassani, M. (2012) Assessing International Transferability of Highway Safety Manual Crash Prediction Algorithm and Its Components. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2279(1), 90–98. doi:[10.3141/2279-11](https://doi.org/10.3141/2279-11)

Saha, D., Alluri, P., e Gan, A. (2015) Prioritizing Highway Safety Manual's crash prediction variables using boosted regression trees. *Accident Analysis & Prevention*, 79, 133–144. doi:[10.1016/j.aap.2015.03.011](https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.03.011)

Shin, H.-S., Dadvar, S., e Lee, Y.-J. (2015) Results and Lessons from Local Calibration Process of the *Highway Safety Manual* for the State of Maryland. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2515(1), 104–114. doi:[10.3141/2515-14](https://doi.org/10.3141/2515-14)

Silva, K. C R. (2012), Aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do estado de São Paulo. Universidade de São Paulo.

Silva, K. C R. (2017), Avaliação da Transferibilidade de modelos de previsão de acidentes em rodovias de pista simples do Brasil. Universidade de São Paulo.

Srinivasan, R., D. Carter, and K. Bauer. (2013) *Safety Performance Function Decision Guide: SPF Calibration vs. SPF Development*. FHWA-SA-14-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, Sept. 2013.

Srinivasan, R., Colety, M., Bahar, G., Crowther, B., e Farmen, M. (2016) Estimation of Calibration Functions for Predicting Crashes on Rural Two-Lane Roads in Arizona. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2583(1), 17–24. doi:[10.3141/2583-03](https://doi.org/10.3141/2583-03)

Turner, S., Rohit Singh, Nates, G. D., e NZ Transport Agency. (2012) *The next generation of rural road crash prediction models: final report*. NZ Transport Agency, Wellington, N.Z. Obtido de <http://www.nzta.govt.nz/resources/research/reports/509/docs/509.pdf>

Thomazi K. R. (2018). Elaboração de modelos de previsão de acidentes de trânsito em rodovias rurais de pista simples do estado de Santa Catarina com base no *Highway Safety Manual*. Universidade Federal de Santa Catarina.

Troyer, D., Bradbury, K., e Juliano, C. (2015) Strength of the Variable: Calculating and Evaluating Safety Performance Function Calibration Factors for the State of Ohio. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2515(1), 86–93. doi:[10.3141/2515-12](https://doi.org/10.3141/2515-12)

Victoria Gitelman, e Etti Doveh. (2016) Safety Management of Non-urban Roads in Israel: An Application of Empirical Bayes Evaluation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(5). doi:[10.17265/2328-2142/2016.05.005](https://doi.org/10.17265/2328-2142/2016.05.005)

Waihrich, D. R. L. da S. (2015). Calibração do método de previsão de acidentes do Highway Safety Manual (HSM) para trechos rodoviários de pista dupla do Brasil. 2016. Universidade de Brasília.

Yannis G., Dragomanovits A., Laiou A., Richter T., Ruhl S., Calabretta F. *et al.* (2015). Inventory and critical review of existing APMs and CMFs and related data sources. PRACT project deliverable D4. CEDR Transnational Road Research Programme.

Yannis, G., Dragomanovits, A., Laiou, A., Richter, T., Ruhl, S., La Torre, F., Domenichini, L., Graham, D., Karathodorou, N., e Li, H. (2016) Use of Accident Prediction Models in Road Safety Management – An International Inquiry. *Transportation Research Procedia*, 14, 4257–4266. doi:[10.1016/j.trpro.2016.05.397](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.397)