Karla Cristina Rodrigues Silva

APLICAÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES DO HSM EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES DO ESTADO DE SÃO PAULO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Titular Antonio Clóvis Pinto Ferraz

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Silva, Karla Cristina Rodrigues.

S586a Aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do estado de São Paulo. / Karla Cristina Rodrigues Silva ; orientador Antonio Clóvis Pinto Ferraz. São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Transportes e Área de Concentração em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **KARLA CRISTINA RODRIGUES SILVA**

Título da dissertação: "Aplicação do método de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do estado de São Paulo".

Data da defesa: 24/01/2012

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Titular **Antonio Clóvis Pinto Ferraz (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Profª. Drª. **Bárbara Stolte Bezerra** (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho/UNESP- campus de Bauru)	APROVADA
Profª. Drª. **Maria Teresa Françoso** (Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)	Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

La vérité de demain se nourrit de l'erreur d'hier.

Antoine de Saint-Exupéry

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Antonio Clóvis Pinto Ferraz (Coca) pela orientação, amizade e incentivo.

Aos meus pais, Eunice e José Newton, e aos meus irmãos, Ana Flávia e Tiago, pela compreensão e carinho. Às minhas avós e Vovô Rubens (*in memoriam*) que sempre torceram por mim.

Ao Gustavo Riente, pela dedicação, ternura e companheirismo, e a sua família, cujo apoio foi imprescindível para alcançar esse objetivo.

Aos queridos amigos do NEST-USP, Tiago Bastos (obrigada pela companhia e revisão), Fernando Hirose, Cândido Andrade, Bárbara Bezerra e Magaly Romão pela convivência diária. Aos colegas e amigos da pós-graduação, em especial André Cunha, José Elievam, Gabriela de Morais e Madalena Ribeiro, que estiveram presentes durante a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Transportes da EESC-USP, principalmente aos professores Setti e Antônio Nelson, que contribuíram para minha formação profissional e pessoal, e a Heloisa e Magali, sempre prontas a ajudar.

Aos amigos de longa data, que acompanharam a minha trajetória mesmo que a distância.

À Fátima Elisabeth de Faria, que em nome da concessionária Autovias, do grupo OHL, forneceu as informações sem as quais não seria possível a realização deste trabalho.

À Tectran, pelo reconhecimento do trabalho e pelas oportunidades oferecidas.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pela bolsa de estudos concedida para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço, por fim, a todos aqueles que me incentivaram e torceram por mim.

RESUMO

SILVA, K. C. R. A*plicação do modelo de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do estado de São Paulo*. 95p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2012.

Nesta dissertação é feita uma avaliação dos resultados da aplicação do modelo de previsão de acidentes apresentado no *Highway Safety Manual* – HSM, publicado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) no ano de 2010, para o caso de trechos de rodovia de pista simples localizados no interior do estado de São Paulo. São analisados o método original do HSM, o método do HSM calibrado para os trechos de rodovias estudados e o método empírico de Bayes. Os resultados apresentados pelo método original do HSM são bastante distintos dos valores reais observados, o que exclui a possibilidade do seu emprego direto no universo analisado. No entanto, os valores resultantes da aplicação do método do HSM calibrado e do método de Bayes, em todas as análises realizadas, aproximam-se de maneira satisfatória dos valores observados (com resultados melhores no método de Bayes) – o que mostra que esses métodos podem ser utilizados para a previsão de acidentes no universo analisado, bem como em outras situações com condições similares. Ainda que seja recomendada a realização de estudos específicos para a aplicação do modelo em outras regiões do país, na ausência desses estudos, os valores obtidos neste trabalho podem ser empregados como primeira aproximação.

Palavras-chave: acidentes; método de previsão; rodovia de pista simples; calibração.

ABSTRACT

SILVA, K. C. R. *Application of the HSM crash prediction method for two lane highways of the state of Sao Paulo*. 95p. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2012.

This research conducts an evaluation of the results achieved by means of the application of crash prediction method presented by the Highway Safety Manual - HSM, published by the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) in 2010, for the case of two lane highway segments situated in the state of Sao Paulo. The analyses were aimed at the original method of the HSM, the method calibrated to the studied highways segments and with the use of the empirical Bayes method. The results obtained by application of the HSM original method are quite distinct from the actual crash values observed, which excludes the possibility of its direct employment in the universe analyzed. However, the values resulting from application of the calibrated HSM method and the method of Bayes, in all data analysis, approach satisfactorily the observed values (with better results with the use of Bayes method) - which shows that these methods can be used for the prediction of accidents in the universe analyzed, as well as in other situations with similar conditions. Although it is recommended to perform specific studies for the application of the method in other regions of the country, in the absence of these studies, the values provided by this research study can be used as a first approximation.

Keywords: accident; crash prediction, two lane highways; calibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 –Etapas de aplicação do método de previsão do HSM 34

Figura 3.2 – Definição de segmentos de rodovia e interseções (AASHTO, 2010, adaptada).. 42

Figura 4.1 – Rodovias de pista simples consideradas (AUTOVIAS, 2011, adaptado)..... 57

Figura 4.2 – Segmento em pista simples SP-255 (AUTOVIAS, 2011) 59

Figura 4.3 – Segmento em pista simples SP-318 – até km 270 (AUTOVIAS, 2011) 60

Figura 4.4 – Segmento em pista simples SP-318 – km 270 a km 280 (AUTOVIAS, 2011) ... 61

Figura 4.5 – Segmento em pista simples SP-345 (AUTOVIAS, 2011) 61

Figura 4.6 – Histograma do comprimento dos segmentos da amostra 63

Figura 4.7 – Número de acidentes nos segmentos..... 67

Figura 4.8 – Número de acidentes nos grupos de segmentos 67

Figura 4.9 – Distribuição do número de segmentos associados às distintas quantidades de acidentes 68

Figura 4.10 – Distribuição percentual de acidentes por severidade 69

Figura 5.1 – Número de acidentes previstos nos segmentos 72

Figura 5.2 – Número de acidentes previstos nos grupos 72

Figura 5.3 – Número de acidentes previsto pelo modelo calibrado nos segmentos 74

Figura 5.4 – Número de acidentes previsto pelo modelo calibrado para os grupos 74

Figura 5.5 – Número de acidentes esperado em cada segmento 75

Figura 5.6 – Número de acidentes esperado em cada grupo 76

Figura 5.7 – Número de acidentes nos segmentos..... 77

Figura 5.8 – Número de acidentes nos grupos de segmentos 77

Figura 5.9 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado *versus* Acidentes observados 78

Figura 5.10 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado + EB *versus* Acidentes observados para os segmentos 79

Figura 5.11 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado *versus* Acidentes observados para os grupos 79

Figura 5.12 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado +EB *versus* Acidentes observados para os grupos 80

Figura 5.13 – Número de segmentos associados as diversas quantidades de acidentes 81

Figura 5.14 – Distribuição dos acidentes por severidade: HSM e observada 83

Figura 5.15 – Distribuição agregada dos acidentes por severidade: HSM e observada 83

Figura 5.16 – Distribuição dos acidentes por tipo: HSM x Observada 84

Figura 5.17 – Distribuição dos acidentes por período e por severidade no período noturno: HSM original e observada 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Arredondamento considerado para segmentação de trechos homogêneos referente a largura das faixas (AASHTO, 2010, adaptado) 40

Tabela 3.2 – Arredondamento considerado para segmentação de trechos homogêneos referente a largura dos acostamentos pavimentados (AASHTO, 2010, adaptado) 40

Tabela 3.3 – Distribuição percentual da frequência de acidentes em rodovias de pista simples por severidade (AASHTO, 2010, adaptado) 43

Tabela 3.4 – Distribuição percentual de acidentes por tipo e severidade (AASHTO, 2010) ... 44

Tabela 3.5 – CMF_{ra} Influência da largura da faixa de rolamento em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado) 45

Tabela 3.6 – CMF_{wra} Influência da largura do acostamento em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado) 46

Tabela 3.7 – CMF_{tra} Influência do tipo de revestimento do acostamento em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado) 46

Tabela 3.8 – CMF_{5r} Influência greide no número de acidentes em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado) 48

Tabela 3.9 – Descrição dos sete índices de obstáculos laterais (AASHTO, 2010, adaptado) .. 51

Tabela 3.10 – Proporção de acidentes noturnos em segmentos não iluminados de rodovias de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado) 52

Tabela 3.11 – Dados necessários para calibração do modelo de previsão de acidentes para rodovias de pista simples 54

Tabela 4.1 – Segmentos das rodovias estudadas 62

Tabela 4.2 – Multiplicação dos coeficientes de modificação obtidos 64

Tabela 4.3 – Características dos grupos 65

Tabela 4.4 – Número de acidentes nos diversos segmentos 66

Tabela 4.5 – Número de acidentes nos grupos de segmentos 67

Tabela 4.6 – Distribuição percentual dos acidentes nos segmentos analisados por tipo e severidade..... 69

Tabela 4.7 – Proporção de acidentes noturnos em segmentos não iluminados 70

Tabela 5.1 – Número de acidentes previstos nos segmentos 71

Tabela 5.2 – Número de acidentes previstos nos grupos 72

Tabela 5.3 – Número de acidentes previstos pelo modelo calibrado nos segmentos 73

Tabela 5.4 – Número de acidentes previstos pelo modelo calibrado para os grupos 74

Tabela 5.5 – Número de acidentes previstos com a aplicação do método empírico de Bayes 75

Tabela 5.6 – Número de acidentes previstos para os grupos com a aplicação do método EB 76

Tabela 5.7 – Valores do fator F..... 86

SUMÁRIO

1 Introdução 21
1.1 Contextualização 21
1.2 Objetivo 22
1.3 Método 22
1.4 Estrutura do texto 23
2 Previsão de acidentes 25
2.1 Teorias sobre as causas dos acidentes 25
2.2 Modelos de previsão de acidentes 26
2.2.1 Distribuição de Poisson 26
2.2.2 Distribuição Binomial Negativa 27
2.2.3 Distribuição Poisson-Lognormal 27
2.2.4 Modelo de regressão generalizada 27
2.2.5 Escolha do modelo 27
2.3 *O modelo do Highway Safety Manual(HSM)* 28
2.3.1 Método de previsão de acidentes em rodovias 29
2.3.2 Método empírico de Bayes (EB) 30
2.3.3 *Safety Performance Functions – SPF* 31
2.3.4 Limitações do modelo de previsão de acidentes do HSM 32
3 Método do HSM para previsão de acidentes em rodovias de pista simples 33
3.1 Rodovias de pista simples 33
3.2 Previsão de acidentes para rodovias de pista simples 33
3.2.1 Definição dos limites e tipo de análise 34

3.2.2 Definição do período de análise 35

3.2.3 Determinação do VDMA 35

3.2.4 Determinação das condições de geometria 35

3.2.5 Divisão da rodovia em trechos homogêneos 37

3.2.6 Atribuição do histórico de acidentes para locais específicos 37

3.2.7 Aplicação da função original do HSM (*Safety Performance Function – SPF*) . 38

3.2.8 Aplicação dos fatores de modificação – *CMF's* 38

3.2.9 Aplicação do fator de calibração regional (C_r) 38

3.2.10 Aplicação do método empírico de bayes 38

3.2.11 Números de acidentes de todos os segmentos de rodovia 38

3.2.12 Avaliação dos resultados 39

3.3 Trechos Homogêneos 39

3.4 *Safety Performance Functions – SPF* 42

3.5 Fatores de modificação da *SPF* 44

3.5.1 CMF_{1r} – Largura da faixa de rolamento 44

3.5.2 CMF_{2r} – Largura e tipo de revestimento do acostamento 45

3.5.3 CMF_{3r} – Curvas horizontais: Comprimento, Raio e Presença ou Ausência de Transição em Espiral 47

3.5.4 CMF_{4r} – Curvas horizontais: Superelevação 47

3.5.5 CMF_{5r} - Greides 48

3.5.6 CMF_{6r} – Densidade de acessos 48

3.5.7 CMF_{7r} – Guias sonoras centrais 49

3.5.8 CMF_{8r} – Faixas adicionais 49

3.5.9 CMF_{9r} – Faixa de acomodação central para conversão à esquerda (TWLTL) .. 49

3.5.10 CMF_{10r} –Lateral da via 50

3.5.11 CMF_{11r} – Iluminação 51
3.5.12 CMF_{12r} – Fiscalização eletrônica 52
3.6 Fator de calibração regional (C_r) 52
3.7 Método de calibração do HSM 52
3.7.1 Caracterização dos segmentos 53
3.7.2 Obtenção do fator de calibração C_r 54
3.8 Limitações 55
4 Características das rodovias analisadas 57
4.1 Rodovias analisadas 57
4.1.1 Rodovia SP – 255 58
4.1.2 Rodovia SP-318 59
4.1.3 Rodovia SP- 345 61
4.2 Caracterização dos trechos 61
4.2.1 Geometria e operação 61
4.2.2 Número de acidentes 65
5 Apresentação e análise dos resultados da aplicação do HSM 71
5.1 Resultados obtidos pelo método original do HSM 71
5.2 Resultados obtidos com o método do HSM calibrado 73
5.2.1 Fator de calibração 73
5.2.2 Número de acidentes previstos pelo modelo calibrado 73
5.3 Resultados obtidos com a aplicação do método empírico de Bayes 75
5.4 Análise dos resultados 76
5.4.1 Avaliação gráfica 76
5.4.2 Avaliação da correlação 78
5.4.3 Avaliação da distribuição 81

5.4.4 Avaliação da distribuição por tipo de acidente 82

5.5 *Safety Performance Function* para o universo analisado 85

6 Considerações Finais..... 89

Referências Bibliográficas 91

Apêndice A – *Crash Analysis Tool* (em CD-ROM) 95

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A acidentalidade no trânsito é tema recorrente na literatura do campo dos transportes em razão da magnitude do problema e das suas consequências nefastas (ELVIK et al., 2009; FERRAZ, RAIA JR e BEZERRA, 2008; HAUER, 2007). É tal a relevância do problema, que os acidentes de transporte [denominação IBGE (2006)] integram o quadro de indicadores de desenvolvimento sustentável dos países, dentro da dimensão social.

Atualmente, os acidentes de trânsito provocam no mundo cerca de 1,3 milhão de mortes e perto de 50 milhões de feridos anuais, bem como acarretam um custo altíssimo para a sociedade, estimado em 1,5% do PIB. A previsão é que se políticas adequadas não forem colocadas em prática, o número de mortes atingirá a cifra de 1,9 milhão no ano de 2020 - fazendo com que os acidentes envolvendo veículos de transporte terrestre ocupem a 6ª posição como causa de mortes (3,4% do total). Aproximadamente 80% dos óbitos ocorrem nos países em desenvolvimento. (NEST-USP, 2011).

No Brasil ocorrem mais de um milhão de acidentes de trânsito por ano, que causam mais de 40 mil mortes e cerca de 500 mil feridos, parte considerável ficando com problemas físicos ou mentais que impedem uma vida normal. Isso provoca o sofrimento de milhares de pessoas, desestrutura uma quantidade imensa de famílias e tem um custo para sociedade de mais de 40 bilhões de reais por ano (cerca de 1% do PIB nacional). As projeções apontam ainda para um maior agravamento da situação no futuro, pois o número de mortes entre 2000 e 2010 cresceu a uma taxa anual de 3,46% (NEST-USP, 2011). Em 2009, o Brasil apresentou um índice de 52,84 mortes por bilhão de quilômetro, o que reflete uma situação extremamente grave considerando ser esse valor entre 7 e 12 vezes maior que nos países mais desenvolvidos (BASTOS, 2010).

Somente nas rodovias federais, 4% de toda a malha rodoviária brasileira, foram responsáveis, no ano de 2009, por cerca de 160 mil acidentes e aproximadamente sete mil resultaram em mortes, segundo o Anuário Estatístico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2011).

O cenário descrito mostra a gravidade do problema da acidentalidade viária no Brasil. Em razão disso, o combate a acidentalidade – sobretudo a mortalidade – no trânsito deve ser colocado como uma das prioridades do país.

Apesar dos esforços realizados na busca por medidas eficazes na redução de acidentes, o tratamento das variáveis envolvidas é ainda incipiente e o problema persiste. Acredita-se que uma das formas mais eficiente de sanar o problema seja através de um programa abrangente de gerenciamento da segurança viária (ELVIK et al., 2009; NODARI, 2003).

Os programas de gerenciamento da segurança viária atuam em diversas vertentes como medidas preventivas. Independentemente dos fatores causadores dos acidentes rodoviários, pode-se afirmar que as condições de segurança oferecidas pela via e, consequentemente, a atenuação de acidentes, são fortemente influenciadas pela sua condição física (HARWOOD et al., 2000).

Dessa forma, esforços no sentido de prever acidentes a partir da geometria e condições operacionais da via são desejáveis e cada vez mais necessários, pois constituem ferramentas de grande valia na tomada de decisão no tocante à gestão, operação e manutenção das rodovias e das vias urbanas.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho de mestrado tem por objetivo avaliar os resultados da aplicação do modelo proposto no Manual de Segurança Viária (*Highway Safety Manual – HSM*) publicado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO* – no ano de 2010, em algumas rodovias de pista simples do estado de São Paulo.

1.3 MÉTODO

As etapas a serem cumpridas para a consecução do objetivo são as seguintes:

1. Identificação dos trechos homogêneos das rodovias de pista simples analisadas seguindo os preceitos do HSM;
2. Aplicação do modelo original do HSM e avaliação dos resultados empregando técnicas apropriadas;
3. Adaptação do modelo às rodovias analisadas mediante a calibração de fatores com base nos dados reais de acidentes e avaliação dos resultados empregando técnicas apropriadas;

4. Refinamento do processo de adaptação do modelo do HSM às rodovias analisadas mediante incorporação do método empírico de Bayes e avaliação dos resultados empregando técnicas apropriadas;
5. Análise dos resultados obtidos no modelo (HSM original, HSM adaptado e HSM refinado com o método de Bayes);
6. Considerações finais sobre o estudo.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

Este texto está organizado em 6 capítulos.

No capítulo 1 é realizada a contextualização do tema da pesquisa e são apresentados os objetivos, o método e a estrutura de organização do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão do tema previsão de acidentes, bem como são relatadas as teorias que tentam explicar as razões da ocorrência dos acidentes de trânsito.

No capítulo 3 são descritas as principais características do método de previsão de acidentes para rodovias de pista simples do *Highway Safety Manual* (HSM).

No capítulo 4 são caracterizadas as rodovias que constituem o objeto do estudo e são apresentados os dados de acidentes organizados visando à aplicação do modelo do HSM.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados da aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM.

O capítulo 6 reúne algumas observações finais relevantes sobre o trabalho.

2 PREVISÃO DE ACIDENTES

2.1 TEORIAS SOBRE AS CAUSAS DOS ACIDENTES

No final do século XIX, algumas teorias apontavam os acidentes como eventos puramente aleatórios, sobre os quais o ser humano não teria nenhum controle (BORTKIEWICS, 1898). Essa visão foi confrontada por Greenwood e Yule (1920) por intermédio de um modelo baseado na suposição de diferentes tendências para o acidente (teoria da propensão). Na década de 50, a constatação de que a maioria dos acidentes envolvia condutores comuns enfraqueceu essa teoria.

Devido ao insucesso das teorias anteriores, surgiram especulações sobre a real gênese dos acidentes que têm, geralmente, mais de uma causa e raramente é possível identificar alguma delas como mais decisiva que as outras. Como resposta a esse questionamento, a teoria do sistema (ou teoria epidemiológica), popular nas décadas de 60 e 70, tornou-se a mais bem sucedida. A proposição básica da teoria dos sistemas é que os acidentes são resultados de desajustes na interação entre as várias partes de sistemas complexos. Essa teoria tentou encontrar a solução para o problema dos acidentes modificando os componentes técnicos do sistema de transporte, principalmente aqueles relacionados à engenharia de segurança viária e à engenharia veicular. (ELVIK et al., 2009).

Outras especulações sobre as causas dos acidentes eram focadas nos comportamentos humanos (WILDE, 1994). Essa visão levou a uma ênfase limitada que tentou relacionar apenas a percepção de risco humano com o número de acidentes no trânsito. A formulação incipiente dessa teoria provocou grande discussão e estudos posteriores mostraram que efetivamente ocorre compensação do risco quando os carros são mais seguros, mas não a ponto de compensar o efeito benéfico de novos equipamentos de segurança (FERRAZ, RAIA JR e BEZERRA, 2008).

Embora nenhuma teoria seja considerada ideal pela comunidade científica, a abordagem tradicional usada na avaliação da segurança viária está baseada na compilação de estatísticas sobre a ocorrência de acidentes e sua severidade. A teoria que considera os acidentes sujeitos a flutuações aleatórias desfruta de grande aceitação, uma vez que variações atuais no número de acidentes não refletem necessariamente as mudanças esperadas no longo prazo (HAUER,

2007), isso porque, apesar dos acidentes resultarem de escolhas humanas e de aspectos comportamentais, sua ocorrência depende de uma combinação de fatores (ELVIK et al., 2009; JACOBS, AERON e ASTROP, 2000).

Quando uma avaliação do desempenho da segurança viária deve ser estimada, os métodos de análise tradicionalmente usados são equivalência monetária dos acidentes, frequência e taxa, sumarizados na forma de histórico de acidentes por tipo, severidade, local e em resultados de estudos antes e depois. Esses métodos isolados são bastante limitados, já a sua combinação para previsão de acidentes pode chegar a bons resultados (HARWOOD et al., 2000).

Os modelos de previsão de acidentes permitem a avaliação prévia das ações físicas na via voltadas para o aumento da segurança no trânsito (redução da quantidade e da severidade dos acidentes) como alternativa a dados obtidos no monitoramento da via.

2.2 MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Os modelos de previsão de acidentes são desenvolvidos por técnicas estatísticas, com base na frequência de acidentes[1] observada ao longo do tempo em locais com características físicas semelhantes, para um amplo intervalo de valores do volume de tráfego médio anual (VDMA).

As expressões para previsão de acidentes (*Safety Performance Function – SPF*) são determinadas admitindo que o número de acidentes pode ser ajustado por intermédio dos modelos apresentados a seguir.

2.2.1 DISTRIBUIÇÃO DE POISSON

Como os números de acidente são inteiros não negativos, a aplicação do modelo de regressão de mínimos quadrados (que pressupõe uma variável dependente contínua) não é adequada. Dado que a variável dependente é um inteiro não-negativo a maior parte das teorias recentes usaram a distribuição Poisson como ponto de partida. No entanto, vários pesquisadores constataram que a aplicação direta dessa distribuição pode ser problemática. Especificamente, pelo fato do modelo de Poisson não tratar da super/subdispersão e poder produzir resultados enviesados em amostras pequenas. (LORD, 2006)

[1] Entende-se por frequência de acidentes, o número de acidentes agregados por período de tempo (anos ou meses).

2.2.2 Distribuição Binomial Negativa

A distribuição binomial negativa é uma extensão da distribuição de Poisson que supera possíveis problemas relacionados à superdispersão. Esse modelo é bastante difundido para modelagem da ocorrência de acidentes. (LORD, 2006; MIAOU e LORD, 2003). No entanto, o modelo tem limitações, mais notavelmente a sua incapacidade para lidar com dados dispersos e estimar dispersão para conjuntos amostrais pequenos e médios.

2.2.3 Distribuição Poisson-Lognormal

Alguns pesquisadores têm proposto o uso de uma distribuição combinada Poisson-Lognormal como alternativa a distribuição binomial negativa para modelagem da frequência de acidentes (AGUERO-VALVARDE e JOVANIS, 2009; MIAOU e LORD, 2003). O modelo de Poisson-Lognormal é semelhante ao binomial negativo, mas o termo exponencial da equação é lognormal.

Embora a distribuição Poisson-Lognormal ofereça maior flexibilidade que a binomial negativa, ela tem outras limitações. Por exemplo, a estimativa do modelo é mais complexa, uma vez que a distribuição de Poisson-Lognormal não tem uma forma definida e o resultado pode ser afetado caso a amostra seja pequena.

2.2.4 Modelo de regressão generalizada

O modelo de regressão generalizada foi aplicado na análise de segurança viária por Lord e Persaud (2000) para acidentes em segmentos e interseções de rodovias. O modelo de regressão generalizada, na verdade, não é um modelo de regressão em si, mas um método utilizado para estimar expressões a partir de dados caracterizados pela correlação entre séries.

O modelo de regressão generalizada permite diferentes abordagens para lidar com correlação entre séries, incluindo a dependência e a independência. Todavia, a escolha do tipo de correlação pode ser crítica quando algumas variáveis são omitidas (LORD, 2006).

2.2.5 Escolha do modelo

Uma das lacunas mais críticas na gestão de segurança viária é a falta de métodos confiáveis de previsão de acidentes que avaliem a segurança em rodovias existentes e planejadas (HARWOOD et al., 2000).

Atualmente, os modelos baseados na distribuição binomial negativa e a distribuição de Poisson desfrutam de maior popularidade, uma vez que apresentam resultados que

representam de forma adequada os valores reais de acidentes (HARWOOD, et al. 2000; HAUER, 2007; MIAOU e LORD, 2003). Há ainda outros modelos usados para previsão de acidentes, no entanto com aplicação questionável, devido à falta de evidências da supremacia de um modelo em relação a outro (LORD, 2006).

Após um grande e exaustivo trabalho, a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) lançou, em 2010, a primeira edição do *Highway Safety Manual* (HSM) que fornece um método para a previsão de acidentes, embasado em dados coletados nos Estados Unidos. O método apresenta funções ("expressões") para a estimativa da acidentalidade nos diversos componentes do sistema vário com características definidas como padrão (base), e prevê a aplicação de "fatores de modificação" nos casos reais em que as características dos componentes são distintas do padrão (base).

Também é apresentada no manual a metodologia para adaptação (adequação) das funções ("expressões") originais para outras regiões onde as características do trânsito são distintas, em termos de infraestrutura, tipos de veículos, composição da frota, comportamento dos condutores, tipo de clima, etc. Essa adequação é feita mediante a aplicação de "fator de calibração" baseado nos dados reais de acidentes na região.

O modelo do HSM calibrado para condições locais produzem resultados satisfatórios como constatado em alguns estados americanos (BANIHASHEMI 2011; SUN et al. 2011; UDOT, 2011; XIE et al. 2011).

2.3 O MODELO DO HIGHWAY SAFETY MANUAL(HSM)

O *Highway Safety Manual* é destinado a profissionais que conduzem análises de segurança viária, incluindo, mas não limitado a, planejadores de transportes, engenheiros de tráfego e outros profissionais do setor de transportes que dominam os seguintes conhecimentos básicos (AASHTO, 2010):

- Familiaridade com os princípios gerais e práticas de segurança viária;
- Domínio de procedimentos estatísticos básicos e interpretação de resultados;
- Competência no exercício de segurança viária e capacidade de tomar decisões relativas às medidas operacionais de engenharia de tráfego.

O HSM pode ser aplicado para as seguintes situações (AASHTO, 2010):

- Identificar locais com grande potencial de redução do número de acidentes e sua severidade;
- Identificar fatores que contribuem para ocorrência de acidentes;
- Subsidiar estudos econômicos em avaliações hierárquicas de projetos;
- Avaliar os benefícios da redução de acidentes;
- Calcular o efeito de alternativas de projetos na frequência e severidade de acidentes;
- Auxiliar a tomada de decisões na alocação de recursos visando reduzir a acidentalidade.

O método original do HSM não leva em conta diferenças entre regiões específicas, por isso seu emprego em locais distintos dos quais ele foi desenvolvido deve ser feito com cuidado. Os modelos apresentados no manual não devem ser aplicados na sua forma original em outros países, pois além de redes viárias, o desempenho e comportamento do motorista, assim como a frequência e severidade de acidentes, podem ter variações significativas. É recomendável a adaptação (adequação) empregando a sistemática apresentada no manual (AASHTO, 2010).

2.3.1 Método de previsão de acidentes em rodovias

O método de previsão do número de acidentes (incluindo por severidade de acidentes e tipo de colisão) de uma rede ou infraestrutura de um local individual pode ser aplicado para um dado período de tempo, volume de tráfego, tipo de rodovia e características geométricas da via. Para isso é desenvolvido um modelo de previsão para um número de locais similares, chamados *Safety Performance Functions* (*SPF's*).

No HSM, os modelos de previsão são usados para obter o número de acidentes previsto, $N_{previsto}$, para um determinado local. O modelo é desenvolvido para condições de geometria e operação padrão (base).

Os fatores de modificação (*Crash Modification Factors – CMF's*) são necessários para ajustar as diferenças entre as características das vias analisadas às condições consideradas padrão.

Além disso, o modelo também prevê a aplicação de fatores de calibração, C_x, locais para ajustar as diferenças das características entre a região da aplicação e a região onde as funções originais foram desenvolvidas.

O modelo de previsão para determinação do número de acidentes, $N_{previsto}$, tem a seguinte forma geral (AASHTO, 2010):

$$N_{previsto} = N_{SPFx} \times C_x \times (CMF_{1x} \times CMF_{2x} \times \ldots \times CMF_{yx}) \qquad 2.1$$

em que:

$N_{previsto}$: número previsto de acidentes para um determinado ano e local do tipo *x*;

N_{SPFx}: número previsto de acidentes para a condição ideal considerada no desenvolvimento de *SPF* para o local do tipo *x*;

C_x: Fator de calibração para ajuste do *SPF* as condições regionais em locais do tipo *x*;

CMF_{yx}: Fator de modificação da *SPF* para condição *y* e local do tipo *x*.

2.3.2 Método empírico de Bayes (EB)

Um refinamento dos resultados fornecidos pelo modelo do HSM pode ser realizado mediante a aplicação do método empírico de Bayes (EB), que permite a combinação do número de acidentes previsto, $N_{previsto}$, e do número de acidentes observados, $N_{observado}$.

Na abordagem bayesiana assume-se que os conhecimentos e as incertezas acerca do real valor da ocorrência de um determinado evento em cada unidade dentro de uma determinada população podem ser representados por uma distribuição de probabilidade. O objetivo é atualizar o conhecimento acerca destas quantidades desconhecidas após a observação dos dados. O conhecimento prévio sobre os riscos θi de ocorrência do evento é expresso na distribuição de probabilidade *a priori* ($p(\theta)$); as observações dos dados possuem uma distribuição de probabilidade que depende dos reais riscos de ocorrência do evento em cada área e dos parâmetros que se deseja estimar. Essa distribuição das observações é conhecida como função de verossimilhança ($p(x|\theta)$); a partir da distribuição *a priori* e da função de verossimilhança é possível determinar, via teorema de Bayes, a distribuição de probabilidade *a posteriori* ($p(\theta|x)$), que reflete uma atualização dos conhecimentos anteriores.

A partir da distribuição a *posteriori*, podem ser derivadas estimativas pontuais para os reais riscos de ocorrência do evento em cada população. Tipicamente a distribuição *a posteriori* é o que impossibilita o cálculo analítico de quantidades de interesse, tais como a média *a posteriori* dos parâmetros e os seus desvios padrão.

A abordagem do método Empírico de Bayes (EB) foi originalmente desenvolvida com o propósito de controlar a regressão à média em estudos antes e depois para a avaliação de efeitos das medidas realizadas em segurança viária (ELVIK, 2008). Contudo, o método

empírico de Bayes também é empregado para refinar as estimativas dos modelos multivariados de predição de acidentes, pela obtenção do número esperado de acidentes para cada unidade de estudo, conforme feito por diversos autores (HAUER, 2007; LAN et al., 2009; LORD, 2006; MIAOU e LORD, 2003;).

De acordo com esse método, a melhor estimativa da segurança é obtida pela combinação de duas fontes de informação: um registro de acidentes para uma dada unidade de estudo (interseção, rodovia, segmento, motorista, etc.) e um modelo de previsão de acidentes, mostrando como vários fatores afetam a ocorrência dos acidentes (AASHTO, 2010), conforme as seguintes expressões:

$$N_{esperado} = w \times N_{previsto} + (1{,}00 - w) \times N_{observado} \qquad 2.2$$

$$w = \frac{1}{1 + k \times \sum N_{previsto}} \qquad 2.3$$

em que:

$N_{esperado}$: número de acidentes esperados para o período de análise;

$N_{previsto}$: número de acidentes previsto para o período de análise;

$N_{observado}$: número de acidentes observados anteriores ao período de análise;

w: fator de ponderação referente à *SPF*;

k: parâmetro de dispersão associado à *SPF* (obtido na análise estatística).

2.3.3 *Safety Performance Functions – SPF*

As *Safety Performance Functions (SPF's)* são equações que estimam o número de acidentes em locais específicos em função do VDMA e do comprimento do segmento da rodovia para condições base, que caracterizam a exposição ao risco.

Os modelos *SPF*'s no HSM foram desenvolvidos para três tipos distintos de rodovias (AASHTO, 2010):

1. Rodovias de pista simples (*two lane highways*);
2. Rodovias de pista dupla (*multilane highways*);
3. Vias arteriais urbanas e suburbanas (*urban and suburban arterials*).

Para cada tipo de interseção, semaforizada ou não, também foram desenvolvidas *SPF's*.

2.3.4 Limitações do modelo de previsão de acidentes do HSM

O modelo de previsão de acidentes do HSM leva em conta apenas as características geométricas e de tráfego. Os efeitos de fatores que transcendem a geometria da via são considerados indiretamente mediante a aplicação de fatores de calibração. O modelo se destina principalmente aos efeitos das características físicas com algumas limitações (AASHTO, 2010):

- A distribuição das idades, anos de experiência de direção, uso de equipamentos de segurança, consumo de álcool e fatores comportamentais da população de motoristas em cada local varia substancialmente;
- Os efeitos do clima são abrangidos indiretamente por meio do procedimento de calibração;
- O método considera os volumes de tráfego diários médios anuais (VDMA), mas não sua variação sazonal durante o dia, semana ou ano, ou ainda a proporção de diferentes tipos de veículos.

Por fim, o modelo de previsão do HSM aborda os efeitos de características geométricas individuais do traçado e do controle de tráfego como independentes entre si e ignora as potenciais interações. É provável que essas interações existam e, de forma ideal, deveriam ser consideradas pelo modelo de previsão. Entretanto, tais interações não são plenamente compreendidas até o momento e são difíceis de serem quantificadas. (AASHTO, 2010).

3 MÉTODO DO HSM PARA PREVISÃO DE ACIDENTES EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

3.1 RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

As rodovias de pista simples são caracterizadas por duas faixas operando nos dois sentidos de tráfego e eventuais faixas adicionais. Segundo o HCM (TRB, 2010), as rodovias de pista simples podem ser classificadas quanto à velocidade e percepção do motorista em três categorias:

- Classe I: são aquelas nas quais os motoristas esperam viajar em velocidades relativamente altas e incluem estradas que conectam cidades ou regiões geradoras ou atratoras de volumes significativos de tráfego, além de estradas utilizadas em viagens pendulares;
- Classe II: são aquelas nas quais os motoristas não necessariamente esperam viajar em velocidades altas e incluem estradas turísticas e trechos com relevo montanhoso. Também servem de acessos a rodovias de classe I, podendo ser coletoras ou locais dependendo de sua geometria. Rodovias de classe II são geralmente utilizadas em viagens curtas, ou em parte de viagens mais longa;
- Classe III: são aquelas que incluem trechos principais de pequenas cidades, cujos limites de velocidades são menores ou com restrições. Também podem incluir estradas turísticas nas quais a beleza é um fator muito importante.

Diferentemente do HCM, no HSM (AASHTO, 2010) há pouco interesse nas medidas de desempenho do tráfego. O foco é nas características da via, exposição ao tráfego e na interação entre motoristas, de forma que as rodovias são classificadas segundo o nível de urbanização, como rurais ou urbanas:

- Rurais: são aquelas localizadas em áreas com população inferior a 5000 habitantes;
- Urbanas: são aquelas localizadas em áreas com população superior a 5000 habitantes;

3.2 PREVISÃO DE ACIDENTES PARA RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

A previsão de acidentes em rodovias de pista simples pode ser empregada para estimar a frequência total de acidentes ou a frequência de acidentes segregada por severidade e tipo. A

aplicação do método do HSM é divida em etapas, conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.1.

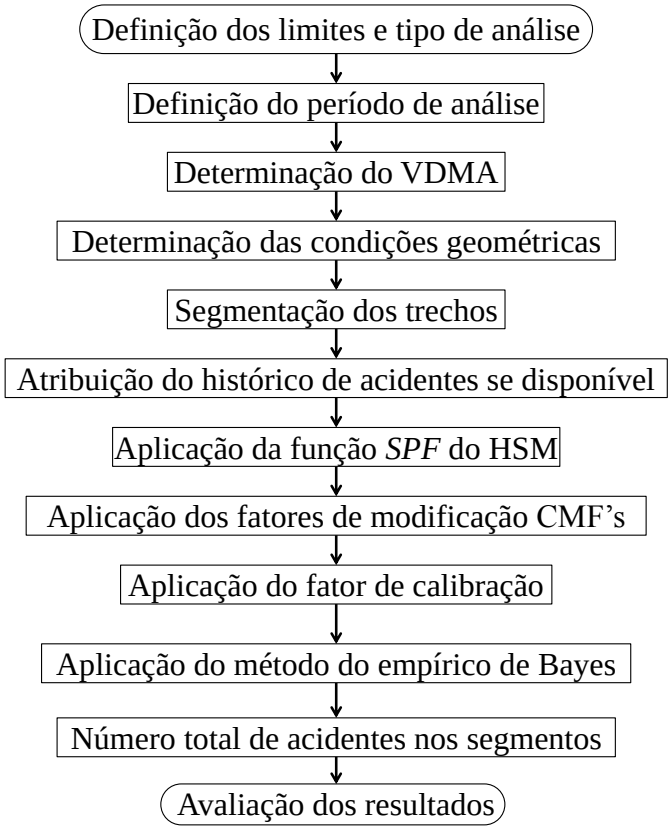

Figura 3.1 –Etapas de aplicação do método de previsão do HSM

Dependendo da situação, algumas etapas podem ser suprimidas em razão da ausência de dados ou indisponibilidade dos mesmos. Outras etapas podem ter necessidade de repetição devido às alternativas e horizontes de projeto. O detalhamento das etapas está condensado nos itens a seguir.

3.2.1 Definição dos limites e tipo de análise

O método de previsão de acidentes pode ser aplicado para diversos tipos de análise e conjunto de segmentos, bem como para segmentos individuais. Ele pode ser aplicado em rodovias existentes, alternativas de intervenção em rodovias existentes e em novas concepções.

Os limites a serem analisados (posição inicial e final) dependem da natureza do estudo. O estudo pode ser delimitado tanto para locais isolados quando para grupos de segmentos contínuos.

3.2.2 Definição do período de análise

O método de previsão pode ser usado para períodos de análise passados ou futuros, determinado pela disponibilidade dos dados de tráfego (VDMA) observados ou estimados para o futuro, frequência de acidentes e condições de geometria da via. O período de análise a ser usado depende da proposta do estudo.

Para estudos em períodos passados com volume de tráfego observado, deve-se considerar:

- Sistema viário, rodovia ou local existente. Se o histórico de acidentes está disponível, o período de estudo é referente ao período do histórico para cada condição geométrica e dados de tráfego conhecidos;
- Alternativas de intervenção de curto prazo para sistema viário, rodovia ou local existente.

Para estudos em períodos futuros com volume de tráfego estimado, deve-se considerar:

- Cenários futuros de sistema viário, rodovia ou local existente com previsão de crescimento de tráfego disponível;
- Alternativas de intervenção futuras para sistema viário, rodovia ou local existente;
- Novas concepções viárias.

3.2.3 Determinação do VDMA

Para períodos passados, o VDMA pode ser determinado a partir da série histórica do tráfego ou pode ser estimado a partir de uma amostra, como por exemplo, contagens classificadas. Para cada segmento de rodovia de pista simples, o VDMA é o volume diário médio nos dois sentidos de tráfego do ano de análise.

Em muitos casos, o VDMA não está disponível para todo o período de análise. Nesses casos, o volume de tráfego deve ser interpolado ou extrapolado de forma apropriada. Na falta de métodos estabelecidos para fazer isso, o VDMA de um ano individual deve ser assumido para todos os anos de análise. (AASHTO, 2010).

3.2.4 Determinação das condições de geometria

Para determinar as condições de geometria é necessário conhecer as condições base consideradas no modelo de regressão *SPF*, que são:

- Largura da faixa de rolamento (*LW*) igual a 3,6 m;
- Largura do acostamento (*SW*) igual a 1,8 m;

- Acostamento pavimentado;
- Índice de obstáculos laterais à direita do sentido de tráfego (*Roadside Hazard Rating – RHR*) igual a três em uma escala de 1 a 7 (explicado com mais detalhes no item 3.5.10);
- Densidade de acessos em rodovias (*DD*) igual a oito acessos por km.
- Relevo plano;

As condições base não incluem ainda a presença de iluminação da via, faixas adicionais, fiscalização eletrônica, guias sonoras na pista e curvatura vertical ou horizontal.

As condições de geometria que devem ser consideradas para aplicação do modelo e posterior aplicação dos fatores de modificação em relação às condições base são:

- Comprimento do segmento (km);
- VDMA (veículos por dia);
- Largura da faixa de rolamento (m);
- Largura do acostamento (m);
- Tipo de revestimento do acostamento (pavimentado, terra, etc.);
- Presença ou ausência de curvatura horizontal. Caso o segmento tenha curvas, deve-se determinar:
    - ✓ Comprimento da curva horizontal, incluindo comprimento da transição espiral (m);
    - ✓ Raio da curva horizontal (m);
    - ✓ Presença ou ausência de transição espiral;
    - ✓ Superelevação da curva horizontal e superelevação máxima (e_{max}) permitida por normas;
- Rampas (%);
- Densidade de acessos (acessos/km);
- Presença ou ausência de guias sonoras centrais (*centerline rumble strip*);
- Presença ou ausência de faixas adicionais;
- Presença ou ausência de faixa de acomodação central para conversão à esquerda (*Two-Way Left Turn Lanes* - TWLTL);
- Índice de obstáculos laterais (à direita do sentido de tráfego);
- Presença ou ausência de iluminação no segmento;
- Presença ou ausência de fiscalização eletrônica.

3.2.5 Divisão da rodovia em trechos homogêneos

Os segmentos de uma rodovia podem diferir ao longo da sua extensão em função da descontinuidade de suas características físicas e operacionais. Em razão dessa variação, a rodovia analisada deve ser dividida em trechos homogêneos.

Essa lógica cartesiana é preconizada pelo HCM e HSM para facilitar a análise e definir padrões para as avaliações. Como regra geral, o comprimento do trecho não deve ser inferior a 200 m. O modelo de previsão de acidentes resulta no número de acidentes esperado para todo o segmento, que é a soma da avaliação de todos os trechos homogêneos no período de estudo.

3.2.6 Atribuição do histórico de acidentes para locais específicos

A atribuição do histórico de acidentes depende do tipo de estudo. Quando locais existentes são analisados, o método empírico de Bayes pode ser usado. Para isso, são necessários os dados de frequência de acidentes para a rodovia como um todo ou para trechos específicos. Esses dados são obtidos diretamente no órgão regulamentador ou fiscalizador de acidentes.

Alternativamente, se os dados da frequência de acidentes são disponíveis, mas não podem ser alocados em pontos ou locais específicos da rodovia, deve-se fazer uma análise mais geral em nível estratégico. Caso não haja disponibilidade de dados, a estimativa da frequência de acidentes será limitada ao modelo de previsão considerado.

Em análises envolvendo projetos futuros, o histórico de acidentes pode ser aplicado nas seguintes situações:

- Locais nos quais as condições operacionais e de geometria não sofreram modificações (e.g. alternativa “zero”);
- Projetos de modificação da seção transversal da via em que o número de faixas permanece o mesmo;
- Projetos de inserção de faixas adicionais ou um curto trecho com quatro faixas em rodovias de pista simples com intuito de aumentar as oportunidades de ultrapassagem;
- Modificação leve de traçado, apenas para melhorar a adequação às curvas.

Em casos de mudanças operacionais e de traçado substanciais, essa etapa não deve ser considerada.

3.2.7 Aplicação da função original do HSM (*Safety Performance Function – SPF*)

Para segmentos de rodovia, as *SPF* são desenvolvidas para condições ideais e são ajustados pelos *CMF's* para retratar melhor o segmento estudado. O item 3.4 aborda o modelo *SPF* para rodovias de pista simples de forma mais detalhada.

3.2.8 Aplicação dos fatores de modificação – *CMF's*

De forma a levar em conta a diferença entre os segmentos reais estudados e a condição ideal, são necessários fatores de modificação (*CMF's*), multiplicadores. Esses fatores são aplicados para ajustar o modelo *SPF*. O item 3.5 especifica as condições consideradas no *CMF's*.

3.2.9 Aplicação do fator de calibração regional (C_r)

O modelo *SPF* usado na previsão de acidentes foi desenvolvido a partir de dados de uma determinada região e para um determinado período. O fator de calibração regional (C_r) leva em conta essas diferenças, como discutido no item 3.6.

3.2.10 Aplicação do método empírico de Bayes

O método empírico de Bayes (EB) deve ser aplicado quando for possível a atribuição do histórico de acidentes. Para locais específicos o método EB combina a frequência de acidentes prevista, $N_{previsto}$, com a frequência de acidentes observada, $N_{observado}$. Isso proporciona maior consistência estatística na estimativa de acidentes do modelo.

3.2.11 Números de acidentes de todos os segmentos de rodovia

O número total de acidentes na rodovia é obtido pela soma dos acidentes nos diversos segmentos (AASHTO, 2010), conforme expressão:

$$N_{total} = \sum_{\substack{todos \\ segmentos \\ da\ rodovia}} N_{rs} \qquad 3.1$$

em que:

N_{total}: número total previsto de acidentes dentro dos limites considerados da rodovia para um determinado período de estudo;

N_{rs}: número previsto de acidentes em cada segmento da rodovia para o período de estudo;

O número de acidentes médio do período de acidentes pode ser obtido por:

$$N_{médio} = \frac{N_{total}}{n} \qquad 3.2$$

em que:

$N_{médio}$: número médio anual previsto de acidentes;

n: número de anos do período estudado;

3.2.12 Avaliação dos resultados

As etapas da análise devem ser feitas para todas as alternativas de projeto, caso haja mais de uma, para permitir a comparação entre os resultados. Adicionalmente, pode ser feita uma avaliação da distribuição de tipos severidade de acidentes para situações distintas.

3.3 Trechos Homogêneos

Ao longo da rodovia, existe uma variação das características físicas e operacionais. Assim, divide-se a rodovia em um conjunto de segmentos, chamados de trechos homogêneos.

Quando a rodovia é bem uniforme, a divisão em trechos homogêneos é dada entre interseções. Do contrário, a divisão é feita sempre que houver (AASHTO, 2010):

- Inicio ou fim de curva horizontal (transições em espiral são consideradas parte da curva);
- Ponto de interseção vertical (PVI) em curvas côncavas ou convexas ou ponto de inflexão entre dois greides;
- Inicio ou fim de faixas adicionais ou curtos segmentos de pista dupla sem divisão central física destinada ao aumento das oportunidades de ultrapassagem;

Também, um novo trecho deve ser inserido quando ao menos umas das características a seguir apresentar variação:

- Volume diário médio anual (VDMA);

- Largura da faixa (*LW*);
  - ✓ A precisão de determinação da largura da faixa pode ser de aproximadamente dez centímetros[2]; para divisão de trechos homogêneos é recomendado seguir os arredondamentos apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Arredondamento considerado para segmentação de trechos homogêneos referente a largura das faixas (AASHTO, 2010, adaptado)

LW – Largura da faixa medida (m)	Arredondamento (m)
$LW \leq 2{,}8$	$\geq 2{,}8$
$2{,}8 < LW < 3{,}0$	2,9
$3{,}0 \leq LW \leq 3{,}1$	3,0
$3{,}1 < LW \leq 3{,}3$	3,2
$3{,}3 < LW \leq 3{,}4$	3,4
$3{,}4 < LW < 3{,}6$	3,5
$LW \geq 3{,}6$	3,6

- Largura do acostamento (*SW*);
  - ✓ A precisão de determinação da largura do acostamento pode ser de aproximadamente dez centímetros; para divisão de trechos homogêneos é recomendado seguir os arredondamentos apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Arredondamento considerado para segmentação de trechos homogêneos referente a largura dos acostamentos pavimentados (AASHTO, 2010, adaptado)

SW – Largura do acostamento medida (m)	Arredondamento (m)
$SW \leq 0{,}2$	0,0
$0{,}2 < SW < 0{,}5$	0,3
$0{,}5 \leq SW \leq 0{,}8$	0,6
$0{,}8 \leq SW \leq 1{,}1$	0,9
$1{,}1 < SW \leq 1{,}4$	1,2
$1{,}4 < SW \leq 1{,}7$	1,5
$1{,}7 < SW < 2{,}0$	1,8
$2{,}0 < SW < 2{,}3$	2,1
$SW \geq 2{,}3$	2,4

- Tipo do revestimento do acostamento;

[2] A precisão recomendada no HSM é de 0,1 pés, entretanto os intervalos de medidas da largura da faixa (LW) são apresentados no manual a cada 0,3 ou 0,4 pés, ou seja, a aproximadamente 10 cm (vide Tabela 3.1), razão pela qual esse nível de precisão foi considerada neste estudo.

- Densidade de acessos (acessos/km);
  - ✓ Para segmentos muitos curtos (menores que 0,8 km) o uso da densidade de acessos para um segmento individual resulta em um número de acessos superior ao real, uma vez que a densidade de acessos é inversamente proporcional ao comprimento do segmento.
- Índice de obstáculos laterais (*roadside hazard rating –RHR* – à direita do sentido de tráfego);
  - ✓ O índice de obstáculos laterais é medido em uma escala de 1 a 7, usado para determinação de fatores de modificação (vide item 3.5.10). Como o valor desse índice é subjetivo e pode variar segundo a opinião do analista, é razoável assumir que em um mesmo trecho homogêneo possa haver uma variação de até dois níveis nessa escala.
- Presença/ausência de guias sonoras centrais (*centerline rumble strip*);
- Presença/ausência de iluminação na rodovia;
- Presença/ausência de fiscalização eletrônica;

Não há quantidade mínima de segmentos para aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM. Entretanto o comprimento do trecho não deve ser inferior a 200 m, uma vez que trechos muito pequenos não afetam significativamente os resultados do modelo.

Para aplicação do método empírico de Bayes, os acidentes observados são atribuídos a segmentos individuais ou interseções. Acidentes que ocorrem entre interseções são classificados como relacionados à interseção ou relacionados ao segmento da rodovia, dependendo de sua proximidade da interseção. A metodologia para atribuir os acidentes aos segmentos de rodovias ou as interseções é determinada segundo a localização dos acidentes:

- Todos os acidentes que ocorrem nos limites da interseção (região A da Figura 3.2) são atribuídos à interseção;
- Acidentes que ocorrem fora dos limites da interseção (região B da Figura 3.2) são atribuídos ao segmento de rodovia dependendo da natureza do acidente. Colisões traseiras devem ser incluídas nessa análise, pois podem estar associados a filas oriundas da aproximação.

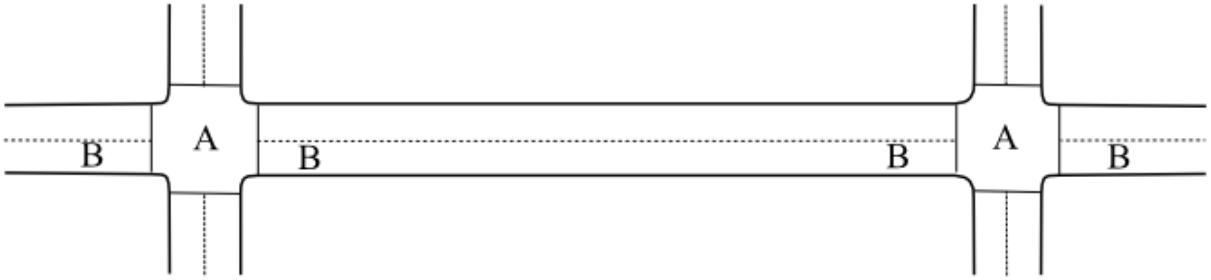

Figura 3.2 – Definição de segmentos de rodovia e interseções (AASHTO, 2010, adaptada)

3.4 *SAFETY PERFORMANCE FUNCTIONS – SPF*

As *Safety Performance Functions* (*SPF*) são usadas para prever a frequência média de acidentes no ano determinado e para condições base (ver item 3.2.4). Cada *SPF* é desenvolvida com dados empíricos para um conjunto de locais com características similares (AASHTO, 2010).

As *SPF*'s, assim como todos os modelos de regressão, estimam o valor de uma variável dependente como função de um conjunto de variáveis independentes. No HSM, a variável dependente estimada é a frequência de acidentes para o segmento de rodovia com as condições ideais e as variáveis independentes são o VDMA e o comprimento do segmento.

Vogt e Bared (1998) estabeleceram essa relação que foi atualizada por Harwood et al. (2000) e implementada no módulo de previsão de acidente do software *Interactive Highway Safety Model* – IHSDM da *Federal Highway Administration* – FHWA. Os coeficientes da *SPF* são variáveis e devem ser ajustados por meio de calibração.

A *SPF* para condições base em rodovias de pista simples apresentado no HSM (AASHTO, 2010) é:

$$N_{SPF\,rs} = VDMA \times \frac{L}{1{,}609} \times 365 \times 10^{\alpha} \times e^{\beta} \qquad 3.3$$

em que:

N_{SPFrs} : número de acidentes previsto para condições base em segmentos de rodovia;

VMDA: volume de tráfego diário médio anual (veículos/dia);

L: extensão do segmento analisado convertido em km;

α *e* β são parâmetros de calibração da *SPF*, sendo os valores encontrados para condições americanas respectivamente (-6) e (-0,312).

A equação apresentada é valida para valores de VDMA entre zero e 17800 veículos/dia. A aplicação do modelo para VDMA's superiores a esse valor produz resultados que podem não ser confiáveis. O valor do parâmetro de superdispersão (*k*) associado ao modelo *SPF* para segmentos de rodovias de pista simples é determinado como função do seu comprimento. Quanto mais próximo de zero é o parâmetro de superdispersão, mais confiável é a previsão de acidentes. O valor do parâmetro de superdispersão *k* é dado por:

$$k = \frac{0{,}236 \times 1{,}609}{L} \qquad 3.4$$

em que:

L: comprimento do segmento de rodovia convertido em km.

É possível supor o número de acidentes previstos por tipo e severidade. Para isso é necessário o conhecimento da distribuição percentual de acidentes por tipo e severidade. A distribuição *default* do HSM é determinada para o período de 2002 a 2006 em rodovias de pista simples de Washington por severidade (Tabela 3.3) e por tipo de acidente (Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Distribuição percentual da frequência de acidentes em rodovias de pista simples por severidade (AASHTO, 2010, adaptado)

Severidade dos acidentes	Percentual do total de acidentes em segmentos de rodovias
Fatal	1,3%
Vítimas com ferimentos graves	5,4%
Vítimas com ferimentos moderados	10,9%
Vítimas com ferimentos leves	14,5%
Danos materiais sem vítimas	67,9%
Total	100%

Tabela 3.4 – Distribuição percentual de acidentes por tipo e severidade (AASHTO, 2010)

Tipo de acidente	Grau de severidade		
	Acidentes com vítimas	Danos Materiais	Total
Acidente envolvendo apenas um veículo			
Atropelamento de animais	3,8%	18,4%	12,1%
Atropelamento de ciclistas	0,4%	0,1%	0,2%
Atropelamento de pedestre	0,7%	0,1%	0,3%
Capotamento	3,7%	1,5%	2,5%
Saída de pista	54,4%	50,5%	52,1%
Outros	0,7%	2,9%	2,1%
Total (apenas um veículo)	63,8%	73,5%	69,3%
Acidente envolvendo mais de um veículo			
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 (mais de um veículo)	36,2%	26,5%	30,7%
Total de acidentes	100,0%	100,0%	100,0%

3.5 FATORES DE MODIFICAÇÃO DA *SPF*

Os fatores de modificação (*CMF's*) são usados para levar em conta as características que diferem das condições base e as peculiaridades de segmentos específicos. O ajuste do modelo *SPF* é feito por multiplicação, como mostrado na equação 2.1. Quando alguma condição do segmento não difere das condições base o fator de modificação é igual 1,0. Caso a condição estudada seja mais conservadora (do ponto de vista da segurança) que a condição base, também chamada padrão, o *CMF* será inferior a 1,0. Do contrário, o valor do *CMF* será superior a 1,0, retratando condições de segurança menos eficientes.

Para segmentos de rodovias, são considerados doze fatores de modificação. Evidentemente, esses doze fatores não retratam todas as condições possíveis, seja pelo fato de algumas situações não serem completamente conhecidas como por alguns aspectos não serem estatisticamente relevantes ou mesmo de quantificação inviável.

3.5.1 CMF_{1r} – LARGURA DA FAIXA DE ROLAMENTO

O fator de modificação devido à diferença da faixa de rolamento (CMF_{1r}) considerado na obtenção da frequência média de acidentes previstos é calculado pela equação:

$$CMF_{1r} = (CMF_{ra} - 1{,}0) \times p_{ra} + 1{,}0 \qquad 3.5$$

em que:

CMF_{1r}: Fator de modificação do efeito da faixa de rolamento no total de acidentes;

CMF_{ra}: Fator de modificação do efeito da faixa de rolamento nos acidentes relacionados à largura da faixa (saída de pista, colisão frontal, colisão lateral) – (Tabela 3.5);

p_{ra}: percentual dos acidentes relacionados.

O percentual dos acidentes relacionados (saída de pista, colisão frontal, colisão lateral) – p_{ra} tem valor *default* estimado por AASHTO (2010) igual a 0,574.

Esse fator de modificação foi desenvolvido por Griffin e Mak (1987) e Zeeger, Deen e Mayes (1981) considerando como condição base, a largura da faixa igual a 3,6 m, caso em que o CMF_{1r} é igual a 1,0. Os CMF_{ra}*'s*, mostrados na Tabela 3.5, são aplicáveis apenas aos tipos de acidentes que são afetados pela largura da faixa: (1) Saída de pista envolvendo um ou mais de um veículo: (2) Colisão frontal; (3) Colisão lateral (com veículos no mesmo sentido e no sentido oposto). Nos outros tipos de acidentes a largura da faixa não exerce grande influência.

Tabela 3.5 – CMF_{ra} Influência da largura da faixa de rolamento em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado)

Largura da Faixa de rolamento (m)	VDMA (veículos/dia) <400	400 até 2000	>2000
≤2,7	1,05	$1{,}05+2{,}81\cdot10^{-4}$(VDMA -400)	1,50
3,0	1,02	$1{,}02+1{,}75\cdot10^{-4}$(VDMA -400)	1,30
3,3	1,01	$1{,}01+2{,}5\cdot10^{-5}$(VDMA -400)	1,05
≥3,6	1,00	1,00	1,00

Se as larguras das faixas por sentido direcional da rodovia de pista simples forem diferentes entre si, deve-se determinar um *CMF* para cada sentido de tráfego. O valor adotado para esse segmento deve ser a média dos *CMF's*.

3.5.2 CMF_{2r} – Largura e tipo de revestimento do acostamento

Os fatores de modificação para acostamento são segregados por largura (CMF_{wra}) e tipo de revestimento (CMF_{tra}). A largura e o tipo de revestimento do acostamento considerados padrão no modelo proposto por Zeeger, Deen e Mayes (1981) são, respectivamente, 1,8 m de acostamento pavimentado.

A Tabela 3.6 contém os valores de *CMF* devido a influência da largura do acostamento para intervalos de volumes de tráfego. Assim como a largura da faixa, a largura e tipo de revestimento do acostamento não afetam todos os tipos de acidentes. Os valores de CMF_{wra}

(Tabela 3.7) e CMF_{tra} afetam os seguinte tipos de acidentes: (1) Saída de pista envolvendo apenas um veículo; envolvendo mais de um veículo: (2) Colisão frontal; (3) Colisão lateral (com veículos no mesmo sentido e no sentido oposto).

Tabela 3.6 – CMF_{wra} Influência da largura do acostamento em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado)

Largura da acostamento (m)	VDMA (veículos/dia) <400	400 até 2000	>2000
0,0	1,10	$1{,}10+2{,}500\cdot10^{-4}$(VDMA -400)	1,50
0,6	1,07	$1{,}07+1{,}430\cdot10^{-4}$(VDMA -400)	1,30
1,2	1,02	$1{,}02+8{,}125\cdot10^{-5}$(VDMA -400)	1,15
1,8	1,00	1,00	1,00
>2,4	0,98	$0{,}98-6{,}875\cdot10^{-5}$(VDMA -400)	0,87

Caso as larguras ou tipo de revestimento do acostamento por sentido direcional da rodovia de pista simples sejam diferentes entre si, deve-se determinar um *CMF* para cada sentido de tráfego. O valor adotado para esse segmento deve ser a média dos *CMF's*.

Tabela 3.7 – CMF_{tra} Influência do tipo de revestimento do acostamento em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado)

Tipo de revestimento	Largura do acostamento(m) 0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,8	2,4
Pavimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cascalho	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02
Composto*	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,04	1,06
Grama	1,00	1,01	1,04	1,05	1,08	1,08	1,11

*O revestimento de acostamento chamado composto é resultado da combinação de 50% de pavimento e 50% de grama.

Para obter a influência de CMF_{wra} e CMF_{tra} no número total de acidentes, deve-se empregar a seguinte equação:

$$CMF_{2r} = (CMF_{wra} \times CMF_{tra} - 1{,}0) \times p_{ra} + 1{,}0 \qquad 3.6$$

em que:

CMF_{2r}: Fator de modificação do efeito da largura e do tipo de revestimento do acostamento no total de acidentes;

CMF_{wra}: Fator de modificação do efeito da largura do acostamento nos acidentes relacionados (saída de pista, colisão frontal, colisão lateral);

CMF_{tra}: Fator de modificação do efeito do tipo de revestimento do acostamento nos acidentes relacionados (saída de pista, colisão frontal, colisão lateral);

p_{ra}: percentual dos acidentes afetados pela largura e tipo de revestimento do acostamento.

O percentual dos acidentes relacionados (saída de pista, colisão frontal, colisão lateral) – p_{ra} tem valor *default* estimado por AASHTO (2010) igual a 0,574.

3.5.3 CMF_{3r} – Curvas horizontais: Comprimento, Raio e Presença ou Ausência de Transição em Espiral

A condição base no alinhamento horizontal é segmento de via em tangente. Para diferenciar os segmentos em tangentes das curvas horizontais foi desenvolvido o CMF_{3r} (ZEGEER et al., 1992), como um modelo de regressão em função do raio da curva em metros (R) e do comprimento da curva em km (L_c), incluindo a transição espiral, se houver. Segue a expressão para determinação do do CMF_{3r}:

$$CMF_{3r} = \frac{(0{,}93 \times L_c) + \left(\frac{24{,}5}{R}\right) - (0{,}012 \times S)}{(0{,}93 \times L_c)} \qquad 3.7$$

em que:

CMF_{3r}: Fator de modificação do efeito do alinhamento horizontal no total de acidentes;

L_c; R: Anteriormente definidos no texto;

S: 1 caso haja transição espiral; 0 caso transição espiral seja ausente; 0,5 caso haja transição espiral em apenas um lado da curva.

Caso o raio de curvatura (R) seja inferior a 30 m, deve-se adotar R igual a 30. Se a extensão da curva (L_c) for inferior a 30 m, recomenda-se usar 30 m (AASHTO, 2010). Também não são considerados valores de CMF_{3r} menores que 1,00.

A avaliação de cada curva deve ser feita separadamente, mesmo em estradas sinuosas com grande número de curvas e possível interação entre elas.

3.5.4 CMF_{4r} – Curvas horizontais: Superelevação

As condições base de superelevação para curvas horizontais consideram as determinações do manual da AASHTO (2004) chamado *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book*). A superelevação é obtida levando em conta a superelevação máxima, $e_{máx}$, permitidos por órgãos fiscalizadores, condições climáticas, entre outros.

O fator de modificação CMF_{4r} é fundamentado na diferença entre a superelevação da curva horizontal e a superelevação recomendada pela AASHTO (2004). Quando essa diferença é mínima ou igual a zero o valor de *CMF* é igual a 1,00.

A função geral para o CMF_{4r} tem a seguinte forma (ZEGEER et al., 1992):

$$CMF_{4r} = 1{,}00\ para\ SV < 0{,}01 \qquad 3.8$$

$$CMF_{4r} = 1{,}00 + 6 \times (SV - 0{,}01) para\ 0{,}01 \leq SV < 0{,}02 \qquad 3.9$$

$$CMF_{4r} = 1{,}06 + 3 \times (SV - 0{,}02)\ para\ SV \geq 0{,}02 \qquad 3.10$$

em que:

CMF_{4r}: fator de modificação do efeito da variação da superelevação no total de acidentes;

SV: diferença da superelevação encontrada (m/m) em relação às recomendadas pela AASHTO (2004).

3.5.5 CMF_{5r} - GREIDES

A condição base no que concerne ao quesito greides é relevo plano. Os fatores de modificação da influência do greide (Tabela 3.8) no número de acidentes foram propostos por Miaou (1998).

A avaliação da curvatura vertical deve ser feita com base nos greides, sendo que cada greide deve ser analisado separadamente sem distinção entre aclives e declives, conforme os valores indicados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – CMF_{5r} Influência greide no número de acidentes em segmentos de rodovia de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado)

Greide aproximado (%)		
Relevo plano (≤3%)	Greide moderado (3%<greide≤6%)	Greide acentuado (>6%)
1,00	1,10	1,16

3.5.6 CMF_{6r} – DENSIDADE DE ACESSOS

A densidade de acessos (*DD*) considerada como condição base é de oito acessos/km.

O fator de modificação da densidade de acessos (CMF_{6r}) deve ser obtido pela equação (AASHTO, 2010):

$$CMF_{6r} = \frac{0{,}322 + (DD \times 1{,}609) \times [0{,}05 - 0{,}005 \times \ln(VDMA)]}{0{,}322 + 5 \times [0{,}05 - 0{,}005 \times \ln(VDMA)]} \qquad 3.11$$

em que:

CMF_{6r} = fator de modificação do efeito da densidade de acessos no número de acidentes;

DD = densidade de acessos em acessos/km;

VDMA = volume de tráfego diário médio anual em veículo/dia;

Todos os acessos de entrada e saída em ambos os sentidos da rodovia devem ser considerados. Acessos com frequência de utilização igual ou inferior a uma vez ao dia devem ser desconsiderados.

3.5.7 CMF_{7r} – GUIAS SONORAS CENTRAIS

As guias sonoras centrais são instaladas em rodovias de pista simples, já que nesse tipo de rodovia não há divisão central física. Embora seja uma ótima medida de segurança, a maior parte dos trechos de rodovias não dispõe desse dispositivo. Dessa forma as condições base não a contemplam, por isso na sua ausência o fator de modificação da influência de guias sonoras centrais (CMF_{7r}) é igual a 1,00. Caso haja guias sonoras centrais o valor de CMF_{7r} no segmento deve ser adotado igual a 0,94.

3.5.8 CMF_{8r} – FAIXAS ADICIONAIS

A condição base para elaboração do modelo de regressão *SPF* é a ausência das faixas adicionais; caso em que o fator de modificação da influência das faixas adicionais (CMF_{8r}) é igual a 1,00.

A presença de faixas adicionais proporciona maior segurança a rodovia, ocasionando redução do CMF_{8r} que deve ser adotado igual a 0,75 para ambos sentidos da via (AASHTO, 2010). No caso de duas faixas adicionais no trecho de rodovia de pista simples o valor do CMF_{8r} é igual a 0,65.

3.5.9 CMF_{9r} – FAIXA DE ACOMODAÇÃO CENTRAL PARA CONVERSÃO À ESQUERDA (TWLTL)

As *Two-Way Left Turn Lanes* – TWLTL, cuja tradução direta é faixa de acomodação central para conversão à esquerda, é uma faixa localizada no centro das rodovias de pista simples que possibilita conversão em ambos os sentidos da rodovia. Essa é uma solução pouco empregada no Brasil, mas bastante comum nos EUA e no Canadá.

A condição base considera ausência dessa faixa, nesse caso fator de modificação do efeito da faixa de acomodação central para conversão (CMF_{9r}) igual a 1,00. Como, no universo analisado, as rodovias têm como característica a condição base, as equações do fator de modificação para situações diferentes da condição base não serão apresentadas.

3.5.10 CMF_{10r} – LATERAL DA VIA

O fator de modificação devido ao efeito da lateral da via à direita do sentido de tráfego na rodovia (CMF_{10r}), desenvolvido por Harwood et al. (2000), é obtido em função de um índice de obstáculos laterais (*roadside hazard rating –RHR*).

O fator CMF_{10r} é dado por:

$$CMF_{10r} = \frac{e^{(-0,6869+0,0668\times RHR)}}{e^{(-0,4865)}} \qquad 3.12$$

em que:

CMF_{10r} = fator de modificação devido ao efeito da lateral da via;

RHR = índice de obstáculos laterais medido em uma escala de 1 a 7.

A condição base pressupõe um índice de obstáculos laterais igual a três em uma escala de 1 a 7. Caso em que CMF_{10r} é igual a 1,00.

Índice de obstáculos laterais (Roadside hazard rating – RHR)

O índice de obstáculos laterais (*Roadside hazard rating – RHR*) é apresentado em uma escala de 1 a 7. Em que “um” representa a melhor situação do ponto de vista da segurança e “sete” a pior. Na Tabela 3.9 são apresentadas as situações associadas aos distintos valores de *RHR*.

Tabela 3.9 – Descrição dos sete índices de obstáculos laterais (AASHTO, 2010, adaptado)

Índice	Largura da zona livre	Inclinação do talude	Lateral da via
1	≥ 10 m	< 1V:4H[1]	-
2	Entre 6 e 7,5 m	≈1V: 4H[1]	
3	≈ 3m	Entre 1V:3H e 1V:4H[2]	Relevo acidentado
4	Entre 1,5 e 3 m	Entre 1V:3H e 1V:4H[3]	Pode haver defensa (distância entre 1,5 e 2 m)
5		≈1V: 3H[4]	Pode haver defensa (distância entre 0 e 1,5 m) ou obstáculos rígidos (distância entre 2 e 3m)
6	≤1,5 m	≈1V: 2H[4]	Sem defensa; Exposição a obstáculos fixos (distância entre 0 e 2 m)
7		≥1V:2H[5]	Sem defensa; Penhasco ou corte vertical em rocha

[1] Motorista consegue recuperar direção;
[2]É possível que o motorista recupere a direção.
[3]É possível que o motorista recupere a direção, entretanto a maiores chances de acidente.
[4]Dificilmente o motorista consegue recuperar a direção.
[5]O condutor não recupera a direção e pode sofrer acidente grave.

Os menores índices representam uma lateral da via mais desobstruída, com menor potencial de acidentes.

3.5.11 CMF_{11r} – ILUMINAÇÃO

A condição base para iluminação é a sua ausência no segmento de rodovia, caso em que o CMF_{11r} é igual a 1,00. O fator de modificação devido à influência da iluminação (CMF_{11r}) é determinado com base no trabalho desenvolvido por ELVIK et al., (2009), conforme seguinte equação:

$$CMF_{11r} = 1{,}0\left[\left(1{,}0 - 0{,}72 \times p_{inr} - 0{,}83 \times p_{pnr}\right) \times p_{nr}\right] \qquad 3.13$$

em que:

CMF_{11r}: fator de modificação do efeito da iluminação no total de acidentes;

p_{inr}: proporção do total de acidentes noturnos em segmentos não iluminados que envolve vitimas;

p_{pnr}: proporção do total de acidentes noturnos em segmentos não iluminados de acidentes com apenas danos materiais;

p_{nr}: proporção do total de acidentes em segmentos não iluminados que ocorrem a noite;

O HSM fornece os valores *default* para as proporções de acidentes noturnos em segmentos não iluminados em rodovias de pista simples indicados na Tabela 3.10, para o caso desses valores não poderem ser determinados.

Tabela 3.10 – Proporção de acidentes noturnos em segmentos não iluminados de rodovias de pista simples (AASHTO, 2010, adaptado)

Acidentes noturnos em segmentos não iluminados	Proporção
Fatais e com vitimas (p_{inr})	0,382
Apenas danos materiais (p_{pnr})	0,618
Acidentes em relação ao valor total (p_{nr})	0,370

3.5.12 CMF_{12r} – FISCALIZAÇÃO ELETRÔNICA

A condição base considera ausência de fiscalização eletrônica. O valor do fator de modificação (CMF_{12r}), segundo AASHTO (2010) na condição base é igual a 1,00. Quando há fiscalização esse fator passa a ser igual a 0,93.

3.6 FATOR DE CALIBRAÇÃO REGIONAL (C_r)

O modelo de previsão de acidentes é calibrado para condições geográficas regionais. As condições geográficas diferem de forma marcante quanto ao clima, características da frota, composição do tráfego, registro de acidentes, etc. Essas variações podem resultar em diferenças significativas da frequência de acidente para o mesmo tipo de rodovia.

O fator de calibração é igual a 1,00 quando o método é aplicado na sua forma original e pode ser diferente após a calibração, dependendo da frequência de acidentes observada.

3.7 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DO HSM

A calibração do modelo no HSM é realizada pela aplicação de um fator multiplicativo para a *SPF* de modo que o número total de acidentes previsto é igual ao número total de acidentes observados em uma região. Como discutido no apêndice A da Parte C do HSM, as amostras selecionadas são usados para encontrar o fator de calibração que fará com que o número total de acidentes previsto seja igual ao observado.

O HSM recomenda o uso de um mínimo de 30-50 trechos selecionados para calibração de um mesmo tipo de via. Esses locais não devem ser selecionados intencionalmente pelo elevado número de acidentes (AASHTO, 2010).

O processo de calibração proposto tanto das condições regionais quanto da *SPF*, envolve as seguintes etapas:

- Etapa 1 – Identificação do tipo de rodovia para qual o modelo de previsão será calibrado;
- Etapa 2 – Seleção dos locais para calibração da curva *SPF* em segmentos de rodovias de pista simples;
- Etapa 3 – Caracterização dos segmentos de rodovia selecionados e definição do período de calibração;
    - ✓ Os dados de calibração devem incluir a frequência total de acidentes esperados para um período de um ou mais anos e as características necessárias para aplicação do modelo;
- Etapa 4 – Aplicação do modelo do HSM original nos locais selecionados, assumindo o fator de calibração regional (C_r) como 1,00.
- Etapa 5 – Obtenção do fator de calibração regional (C_r);

3.7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SEGMENTOS

Para aplicação e adaptação do método nas rodovias selecionadas, o grupo de dados deve conter (AASHTO, 2010):

- O número total de acidentes observados para o período de um ou mais anos;
- Todas as características necessárias para aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM (Tabela 3.11);

Tabela 3.11 – Dados necessários para calibração do modelo de previsão de acidentes para rodovias de pista simples

Características da rodovia	**Necessidade de dados**		**Valores *default****
	Requerido	**Desejável**	
Comprimento do trecho	X		Dado necessário
Volume Diário Médio Anual (VDMA)	X		Dado necessário
Comprimento das curvas horizontais e tangentes	X		Dado necessário
Raio das curvas horizontais	X		Dado necessário
Presença de transição espiral		X	Padrão Local
Variância da superelevação das curvas horizontais		X	Sem variação
Greide		X	Considerar relevo[a]
Largura da faixa	X		Dado necessário
Tipo e largura do acostamento	X		Dado necessário
Presença de iluminação		X	Não iluminado
Densidade de acessos		X	8 acessos/km
Presença de faixa adicional		X	Ausente
Presença de faixa adicional em ambos os lados		X	Ausente
Presença de faixa de acomodação central para conversão	X		Dado necessário
Presença de guias sonoras centrais		X	Padrão Local
Taxa de atrito lateral à via (*RHR*)		X	*RHR* = 3
Radares eletrônicos		X	Padrão Local

* Valores usados na ausência dos dados desejáveis
[a]Valores de *CMF* sugeridos: relevo plano = 1,00; relevo ondulado = 1,06; relevo montanhoso = 1,14

3.7.2 Obtenção do fator de calibração C_r

O fator de calibração da *SPF* é determinado por intermédio da seguinte expressão (AASHTO, 2010, p. A-7)

$$C_r = \frac{\sum_{\substack{todos\ os \\ segmentos}} Acidentes\ observados}{\sum_{\substack{todos\ os \\ segmentos}} Acidentes\ previstos} \qquad 3.14$$

Alternativamente, a calibração também pode ser feita na própria *SPF*, mantendo C_r igual a 1,00 e modificando o valor de β na equação 3.15, obtida mediante a substituição da equação 3.3 na 2.1:

$$N_{previsto} = VDMA \times \frac{L}{1{,}609} \times 365 \times 10^{\alpha} \times e^{\beta} \times C_r \times (CMF_{1r} \times \ldots \times CMF_{12r}) \qquad 3.15$$

O procedimento empregado por UDOT (2011) considera constante (chamada U) o valor da multiplicação entre C_r e e^{β}, já que β também é constante, como na seguinte equação:

$$U = C_r \times e^{\beta} \qquad 3.16$$

Aplicando a propriedade de logaritmos, tem-se:

$$e^{\ln K} = e^{\ln C_r \times e^{\beta}} = e^{\gamma} \qquad 3.17$$

Dessa forma, pode-se obter o novo valor γ para β, o qual pode ser substituído na equação 3.3 mantendo o valor de C_r igual a 1,00.

É interessante incorporar a calibração do parâmetro β quando se nota a necessidade de atualizar a própria *SPF* para um novo período ou local. Esse artifício matemático tem por objetivo obter fatores de calibração a partir de *SPF* que sejam mais recentes, o que facilita outras adaptações futuras.

Outra forma de obter um novo parâmetro β é por meio de algoritmos de otimização para minimização do erro entre o número de acidentes previsto e número de acidentes reais.

Esta etapa é a última considerada na calibração da *SPF*, entretanto, é necessário ainda obter a distribuição dos acidentes por tipo e severidade para substituir os valores *default* encontrados no HSM.

3.8 LIMITAÇÕES

O modelo de previsão de acidentes descrito neste capítulo trata apenas de segmentos e acessos laterais (que não interrompa significativamente a fluidez do tráfego) em rodovias de pista simples. Vale destacar que, o modelo *SPF* apresentado está adequado e calibrado à realidade de alguns estados americanos. Para a utilização em outros países é recomendada a adaptação do modelo (AASHTO, 2010).

4 CARACTERÍSTICAS DAS RODOVIAS ANALISADAS

4.1 RODOVIAS ANALISADAS

Foram analisadas as rodovias de pista simples do estado de São Paulo administrado pela concessionária Autovias, do grupo OHL. O conjunto de rodovias é composto por segmentos da SP-255, da SP-318 e da SP-345 nos trecho que ligam as cidades de Rincão e Araraquara; São Carlos e Rincão e Itirapuã a Patrocínio Paulista, respectivamente.

A localização das rodovias é mostrada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Rodovias de pista simples consideradas (AUTOVIAS, 2011, adaptado)

A montagem do banco de dados para aplicação e calibração envolve diferentes fontes de dados para alimentação do modelo. As principais fontes são:

- Informações fornecidas pela concessionária "Autovias" incluindo: (1) localização de faixas adicionais; (2) marco quilométrico dos sensores de tráfego; (3) localização das praças e dispositivos de fiscalização da velocidade; (4) VDMA para três anos consecutivos (2008, 2009, 2010); (5) registro de acidentes em três anos consecutivos (2008, 2009, 2010) segregados por tipo e severidade;
- Banco de dados de fotografia aérea disponibilizado pela Google;
- Altimetria de um modelo digital de terreno disponibilizado em domínio público pela NASA, a partir do programa *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM (FARR et al., 2007)

De forma a auxiliar a identificação em campo de cada trecho estudado, as coordenadas dos sensores foram registradas no navegador GPS apenas para a rodovia SP-318. O uso do GPS como um recurso de coleta de dados para estudos de planejamento de transportes vem se tornando gradualmente mais comum no mundo todo, sendo recomendado para um grande número de situações (HANNON e SULBARAN, 2008). Assim, o mesmo equipamento de GPS foi também empregado para gravar o percurso realizado na forma de trilhas (*tracks*), com registros da posição geográfica a intervalos de um segundo.

As trilhas registradas pelo navegador GPS foram importadas e tratadas com o auxílio do software *GTM Trackmaker Pro*, empregado para converter esses arquivos, originalmente em formato *.gpx*, tipicamente usado por equipamentos GPS, em coordenadas geográficas (WGS-84).

De posse das trilhas e pontos cadastrados em planilha eletrônica, foi desenvolvido um conjunto de algoritmos em ambiente *Excel/Visual Basic for Applications*, com o objetivo de organizar as informações coletadas, produzir dados adicionais e, por fim, referenciar geograficamente o conjunto de dados completo, de forma a auxiliar a análise posterior dos trechos estudado. Esse método foi desenvolvido e é explicado com detalhes por Riente e Setti (2011). Para os locais sem cadastro foram utilizados os valores das rampas encontradas pela ferramenta de altimetria do *Google Earth* (GOOGLE, 2011).

4.1.1 Rodovia SP – 255

O trecho de pista simples da rodovia SP-255 começa no km 48 +350 e termina no km 77 +200, totalizado 28,850 km de extensão. O diagrama do trecho estudado é mostrado na Figura 4.2

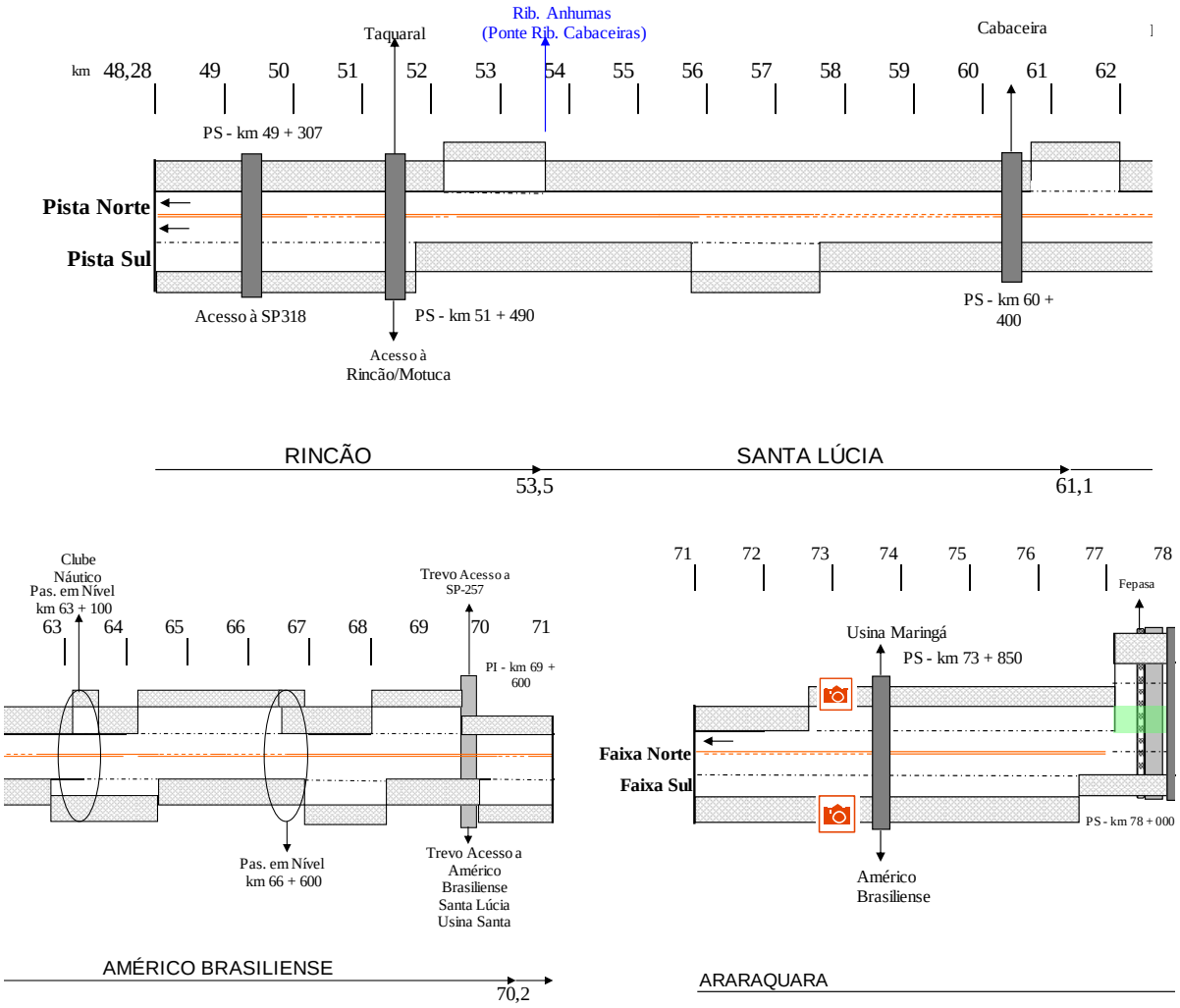

Figura 4.2 – Segmento em pista simples SP-255 (AUTOVIAS, 2011)

O trecho estudado da SP-255 é em grande parte de sua extensão rural em relevo plano, alguns, apenas quatro dos 23 segmentos possuem inclinação acima de 3%.

4.1.2 Rodovia SP-318

O trecho de pista simples da SP-318 tem início no km 234 + 400 e fim no km 280. Constitui o maior trecho de rodovia de pista simples administrado pela Autovias com 45,6 km de extensão. A rodovia SP-318 se encontra em relevo plano segundo critérios do HSM, uma vez que não possui rampa com extensão relevante acima de 3%.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram o trecho em rodovia de pista simples.

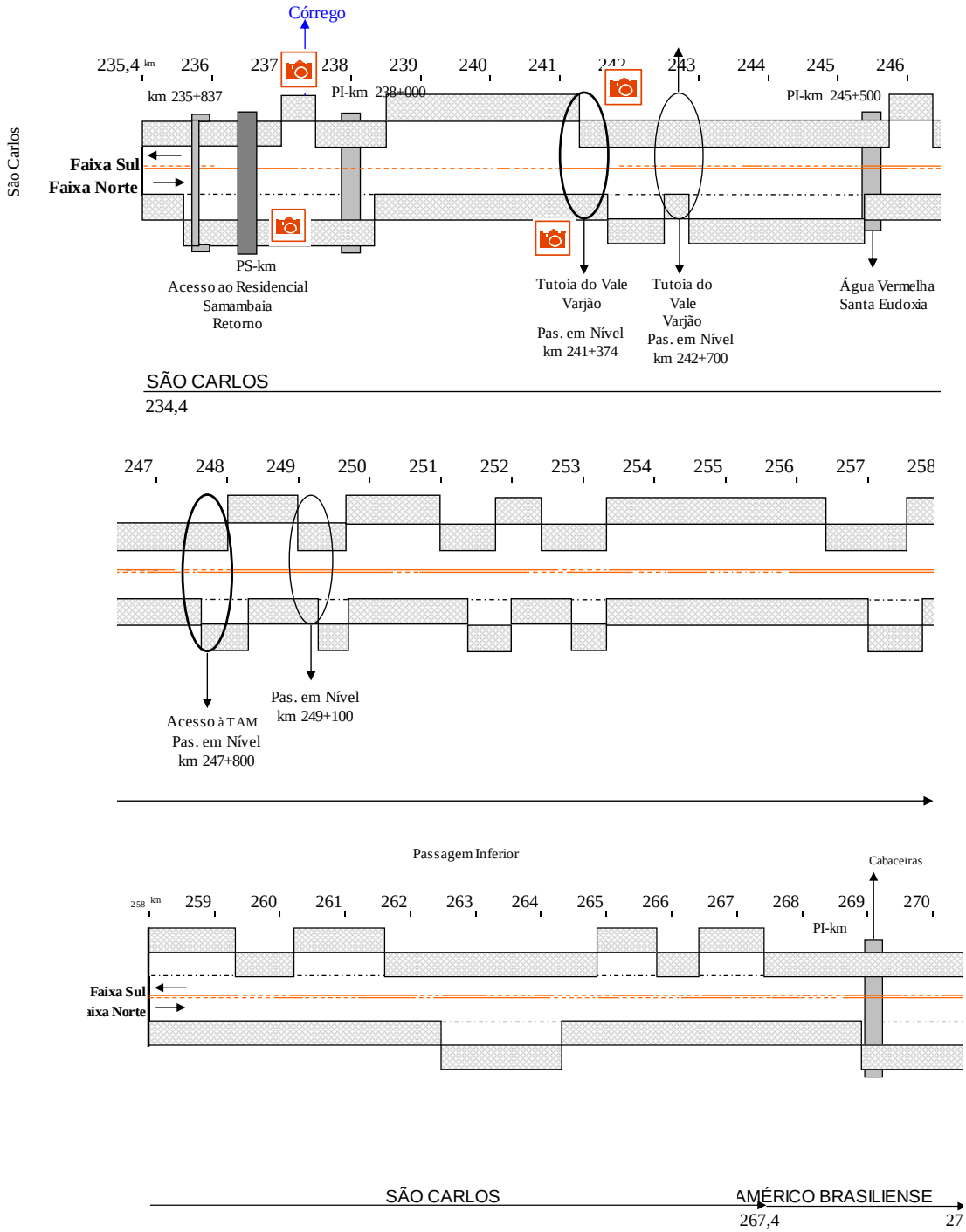

Figura 4.3 – Segmento em pista simples SP-318 – até km 270 (AUTOVIAS, 2011)

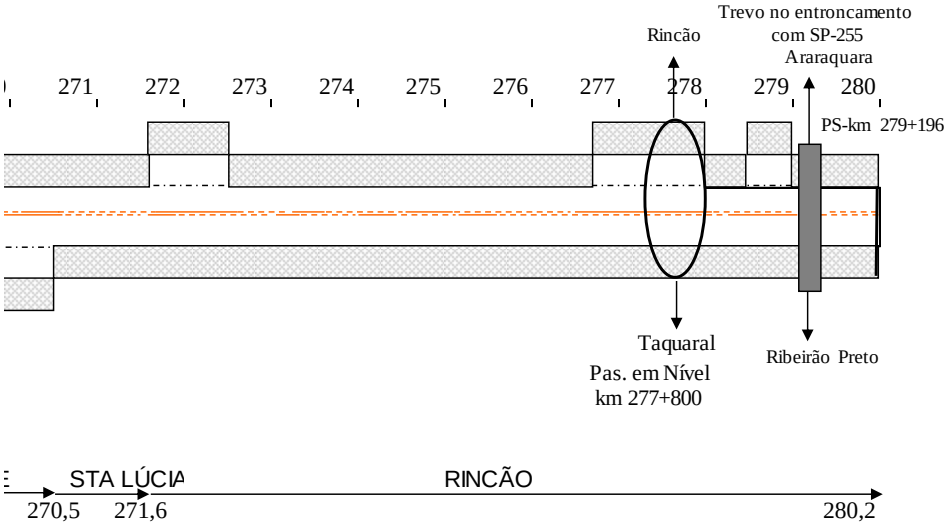

Figura 4.4 – Segmento em pista simples SP-318 – km 270 a km 280 (AUTOVIAS, 2011)

4.1.3 Rodovia SP- 345

O trecho de pista simples da rodovia SP-345 se inicia no km 10 +500 e termina no km 19 +200, totalizado 8,700 km de extensão. O diagrama do trecho estudado é mostrado na Figura 4.5.

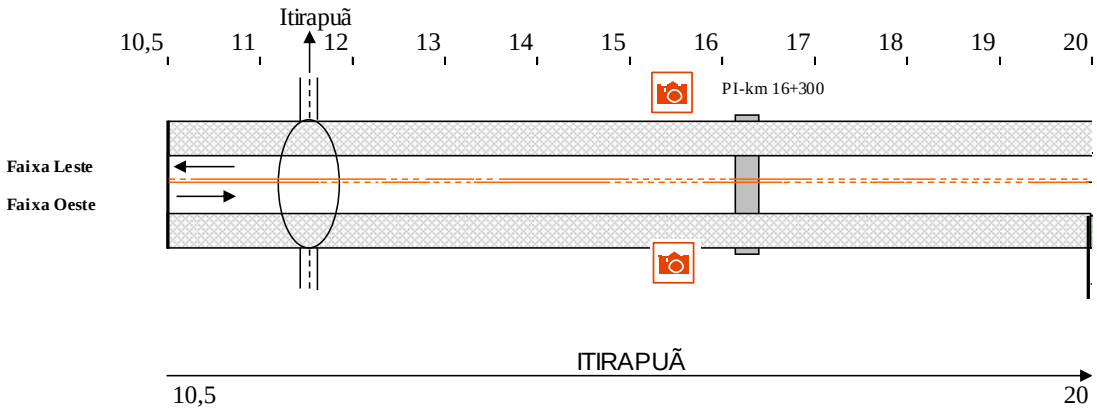

Figura 4.5 – Segmento em pista simples SP-345 (AUTOVIAS, 2011)

O trecho estudado da SP-345 foi considerado rural e ondulado em 2,58 km e rural e plano no restante, determinados segundo inclinação do segmento.

4.2 Caracterização dos trechos

4.2.1 Geometria e operação

Os segmentos foram caracterizados segundo as diretrizes de divisão dos trechos homogêneos prevista pelo HSM conforme indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Segmentos das rodovias estudadas

Rodovia	Seg.	km inicial	km final	Ext. (km)	Rodovia	Seg.	km inicial	km final	Ext. (km)
SP-255	1	48,350	49,350	1,000	SP-318	41	251,380	251,830	0,450
	2	49,350	51,970	2,620		42	251,830	252,040	0,210
	3	51,970	52,130	0,160		43	252,040	252,440	0,400
	4	52,130	52,730	0,600		44	252,440	252,850	0,410
	5	52,730	53,640	0,910		45	252,850	253,350	0,500
	6	53,640	54,300	0,660		46	253,350	255,400	2,050
	7	54,300	55,560	1,260		47	255,400	256,430	1,030
	8	55,560	57,573	2,013		48	256,430	257,070	0,640
	9	57,573	60,655	3,082		49	257,070	257,550	0,480
	10	60,655	62,090	1,435		50	257,550	257,800	0,250
	11	62,090	62,800	0,710		51	257,800	258,800	1,000
	12	62,800	64,100	1,300		52	258,800	259,260	0,460
	13	64,100	64,650	0,550		53	259,260	260,160	0,900
	14	64,650	65,900	1,250		54	260,160	260,900	0,740
	15	65,900	66,600	0,700		55	260,900	261,640	0,740
	16	66,600	68,070	1,470		56	261,640	262,520	0,880
	17	68,070	68,520	0,450		57	262,520	264,260	1,740
	18	68,520	69,510	0,990		58	264,260	264,940	0,680
	19	69,510	69,750	0,240		59	264,940	265,680	0,740
	20	69,750	70,650	0,900		60	265,680	266,440	0,760
	21	70,650	72,700	2,050		61	266,440	267,440	1,000
	22	72,700	76,800	4,100		62	267,440	267,900	0,460
	23	76,800	77,200	0,400		63	267,900	268,900	1,000
SP-318	24	234,400	236,400	2,000		64	268,900	270,480	1,580
	25	236,400	236,960	0,560		65	270,480	271,600	1,120
	26	236,960	237,500	0,540		66	271,600	272,550	0,950
	27	237,500	238,350	0,850		67	272,550	276,700	4,150
	28	238,350	241,330	2,980		68	276,700	278,000	1,300
	29	241,330	241,600	0,270		69	278,000	278,400	0,400
	30	241,600	245,540	3,940		70	278,400	279,000	0,600
	31	245,540	245,800	0,260		71	279,000	280,000	1,000
	32	245,800	246,350	0,550	SP-345	72	10,500	12,500	2,000
	33	246,350	247,570	1,220		73	12,500	13,440	0,940
	34	247,570	248,000	0,430		74	13,440	14,100	0,660
	35	248,000	248,250	0,250		75	14,100	15,500	1,400
	36	248,250	249,000	0,750		76	15,500	16,500	1,000
	37	249,000	249,270	0,270		77	16,500	17,000	0,500
	38	249,270	249,580	0,310		78	17,000	17,560	0,560
	39	249,580	251,050	1,470		79	17,560	19,200	1,640
	40	251,050	251,380	0,330					

Na Figura 4.6 é mostrado o histograma do comprimento dos 79 segmentos, apresentado nos moldes de UDOT (2011). Convém salientar que não há trechos menores que 200 metros conforme recomendado pelo HSM. O comprimento médio dos trechos é de 1,053 km.

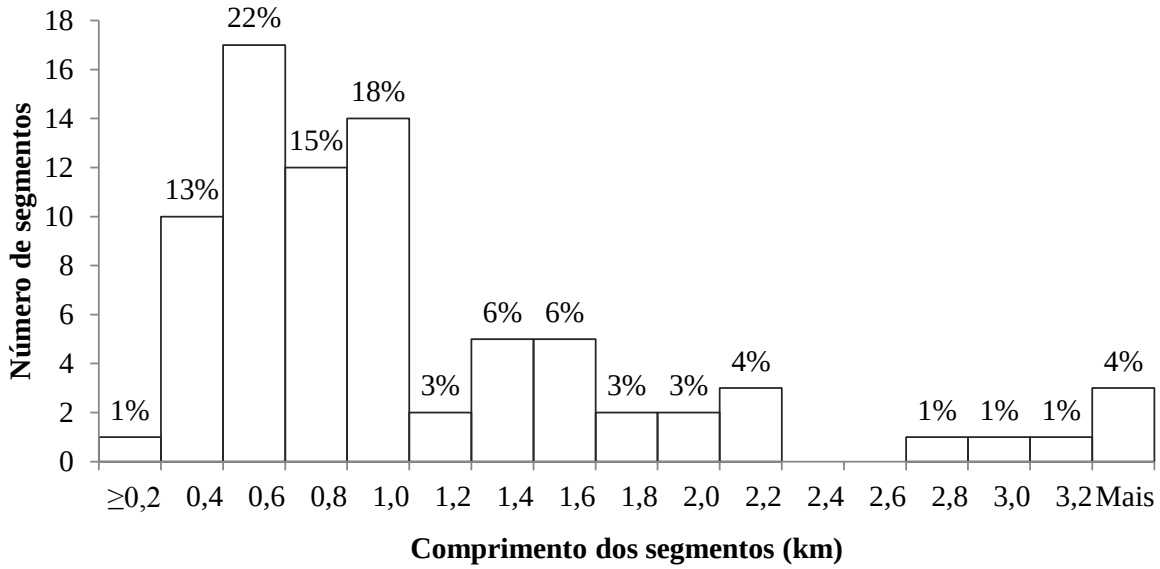

Figura 4.6 – Histograma do comprimento dos segmentos da amostra

O valor encontrado após multiplicação dos *CMF's* (ver Apêndice A – *Crash Analysis Tool* (em CD-ROM)) obtidos para cada ano e em cada segmento, resultante da descontinuidade de cada característica, levadas em conta pelo modelo de previsão do HSM, é mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Multiplicação dos coeficientes de modificação obtidos

Rodovia	Seg.	∏CMF 2008	∏CMF 2009	∏CMF 2010	Rodovia	Seg.	∏CMF 2008	∏CMF 2009	∏CMF 2010
	1	0,76	0,76	0,76		41	0,62	0,62	0,63
	2	0,69	0,69	0,69		42	0,54	0,54	0,54
	3	0,80	0,80	0,81		43	0,62	0,62	0,63
	4	0,80	0,80	0,80		44	0,83	0,83	0,84
	5	0,87	0,87	0,87		45	0,62	0,62	0,63
	6	0,92	0,92	0,92		46	0,62	0,62	0,63
	7	1,01	1,02	1,02		47	0,62	0,62	0,63
	8	0,69	0,69	0,69		48	0,91	0,91	0,92
	9	0,85	0,85	0,85		49	0,68	0,69	0,69
	10	0,64	0,64	0,65		50	0,59	0,59	0,60
	11	0,96	0,96	0,97		51	0,68	0,69	0,69
SP-255	12	0,75	0,75	0,75		52	0,62	0,62	0,63
	13	0,59	0,59	0,59		53	0,83	0,83	0,84
	14	0,64	0,64	0,65		54	0,62	0,62	0,63
	15	0,85	0,85	0,85		55	0,62	0,62	0,63
	16	0,64	0,64	0,65	SP-318	56	0,83	0,83	0,84
	17	0,56	0,56	0,56		57	0,62	0,62	0,63
	18	0,69	0,69	0,69		58	0,83	0,83	0,84
	19	1,11	1,11	1,10		59	0,62	0,62	0,63
	20	0,74	0,74	0,74		60	0,83	0,83	0,84
	21	0,64	0,64	0,65		61	0,62	0,62	0,63
	22	0,55	0,55	0,56		62	0,83	0,83	0,84
	23	0,81	0,81	0,81		63	0,83	0,83	0,84
	24	0,86	0,86	0,86		64	0,70	0,70	0,70
	25	0,73	0,73	0,73		65	0,83	0,83	0,84
	26	0,50	0,50	0,51		66	0,62	0,62	0,63
	27	0,71	0,71	0,71		67	0,83	0,83	0,84
	28	0,58	0,58	0,58		68	0,71	0,71	0,71
	29	1,62	1,61	1,59		69	0,83	0,83	0,84
	30	0,64	0,64	0,64		70	0,62	0,62	0,63
	31	0,83	0,83	0,84		71	0,99	0,99	0,99
SP-318	32	0,62	0,62	0,63		72	0,95	0,95	0,96
	33	0,91	0,91	0,92		73	1,04	1,04	1,04
	34	0,84	0,83	0,83		74	0,96	0,97	0,97
	35	0,59	0,59	0,60	SP-345	75	0,94	0,94	0,94
	36	0,62	0,62	0,63		76	0,89	0,89	0,89
	37	1,41	1,41	1,39		77	0,85	0,85	0,85
	38	0,62	0,62	0,63		78	0,93	0,93	0,93
	39	0,62	0,62	0,63		79	0,93	0,93	0,93
	40	0,83	0,83	0,84					

Para todas as categorias, a largura da faixa de faixa de rolamento está entre 3,3 e 3,6 m, a largura do acostamento é maior que 2,4, isto é, está no mesmo intervalo avaliado pelo modelo e o tipo de revestimento do acostamento é pavimento em todos os segmentos.

Os trechos obtidos podem ser agrupados em 20 categorias, conforme Tabela 4.3, à luz da combinação das características que apresentam diferentes coeficientes de modificação, a saber: (1) existência ou não de curvatura horizontal; (2) tipo de relevo; (3) valor do *RHR*; (4) presença ou não de faixa adicional; (5) presença ou não de dispositivo de fiscalização da velocidade (radar ou similar); (6) existência ou não de iluminação.

Tabela 4.3 – Características dos grupos

Grupo	Curva Horizontal	Relevo	Faixa adicional	*Road Hazard Rating (RHR)*	Iluminação	Radar	Segmentos pertencentes a cada grupo
1	Não	Ondulado	Sim	3	Não	Não	1, 12, 15
2	Não	Ondulado	Não	3	Não	Não	79
3	Não	Plano	Sim	2	Não	Não	2, 27
4	Não	Plano	Não	2	Não	Não	39
5	Não	Plano	Sim	4	Não	Não	23
6	Não	Plano	Não	4	Não	Não	6, 11
7	Não	Plano	Não	4	Sim	Não	24
8	Não	Plano	Não	4	Não	Sim	75
9	Não	Plano	Sim	5	Não	Não	5
10	Não	Plano	Não	5	Não	Não	7, 29
11	Não	Plano	Sim	3	Não	Não	8, 10, 13, 14, 16, 17, 18, 21, 32, 34, 35, 36, 38, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 57, 59, 61, 64, 66, 68, 70
12	Não	Plano	Sim	3	Não	Sim	22, 26, 28, 30
13	Não	Plano	Não	3	Não	Não	19, 31, 33, 37, 40, 44, 48, 53, 56, 58, 60, 62, 63, 65, 67, 69, 71, 77, 78
14	Sim	Plano	Não	3	Não	Sim	76
15	Sim	Plano	Não	3	Não	Não	74
16	Sim	Ondulado	Não	3	Não	Não	73
17	Sim	Ondulado	Sim	3	Não	Não	20
18	Sim	Plano	Sim	3	Não	Não	25
19	Sim	Plano	Não	4	Não	Não	72
20	Sim	Plano	Sim	4	Não	Não	4

4.2.2 NÚMERO DE ACIDENTES

O total de acidentes ocorrido nas rodovias de pista simples estudadas soma 494, computados em um período de três anos (2008, 2009 e 2010), sendo 192 acidentes na rodovia SP-255, 219 acidentes na SP-318 e 83 acidentes na SP-345. Na Tabela 4.4 é apresentado o número de acidentes em cada segmento considerado.

Tabela 4.4 – Número de acidentes nos diversos segmentos

Rodovia	Seg.	N° de acidentes				
		2008	2009	2010	Média	Total
SP-255	1	5	10	3	6	18
	2	3	5	4	4	12
	3	3	1	0	1	4
	4	0	0	0	0	0
	5	4	4	0	3	8
	6	2	2	2	2	6
	7	4	3	2	3	9
	8	2	3	5	3	10
	9	9	2	2	4	13
	10	2	4	3	3	9
	11	0	1	0	0	1
	12	2	2	1	2	5
	13	0	0	0	0	0
	14	2	2	3	2	7
	15	0	3	0	1	3
	16	0	4	3	2	7
	17	0	0	1	0	1
	18	0	5	1	2	6
	19	1	1	2	1	4
	20	0	5	4	3	9
	21	2	5	5	4	12
	22	11	11	19	14	41
	23	4	1	2	2	7
SP-318	24	3	9	5	6	17
	25	4	8	0	4	12
	26	1	1	3	2	5
	27	2	1	6	3	9
	28	7	7	11	8	25
	29	1	3	3	2	7
	30	5	6	14	8	25
	31	0	0	0	0	0
	32	2	3	0	2	5
	33	1	3	4	3	8
	34	0	0	1	0	1
	35	1	2	0	1	3
	36	0	1	1	1	2
	37	3	1	0	1	4
	38	0	0	0	0	0
	39	1	3	2	2	6
	40	0	0	0	0	0
SP-318	41	0	0	0	0	0
	42	0	2	0	1	2
	43	0	1	0	0	1
	44	0	0	0	0	0
	45	1	2	0	1	3
	46	0	0	3	1	3
	47	1	0	1	1	2
	48	1	1	0	1	2
	49	0	2	0	1	2
	50	0	0	0	0	0
	51	4	0	2	2	6
	52	1	1	0	1	2
	53	1	0	1	1	2
	54	1	0	0	0	1
	55	0	0	1	0	1
	56	0	0	0	0	0
	57	1	4	4	3	9
	58	0	0	0	0	0
	59	0	1	0	0	1
	60	0	0	0	0	0
	61	1	0	1	1	2
	62	0	1	0	0	1
	63	0	0	0	0	0
	64	1	3	2	2	6
	65	1	0	0	0	1
	66	0	0	0	0	0
	67	1	10	2	4	13
	68	1	4	6	4	11
	69	0	2	0	1	2
	70	0	1	1	1	2
	71	1	6	8	5	15
SP-345	72	5	8	5	6	18
	73	2	1	2	2	5
	74	2	1	3	2	6
	75	4	8	3	5	15
	76	12	1	3	5	16
	77	2	1	1	1	4
	78	2	2	1	2	5
	79	5	4	5	5	14
Total						**494**

A representação gráfica do número de acidentes em cada segmento se encontra na Figura 4.7.

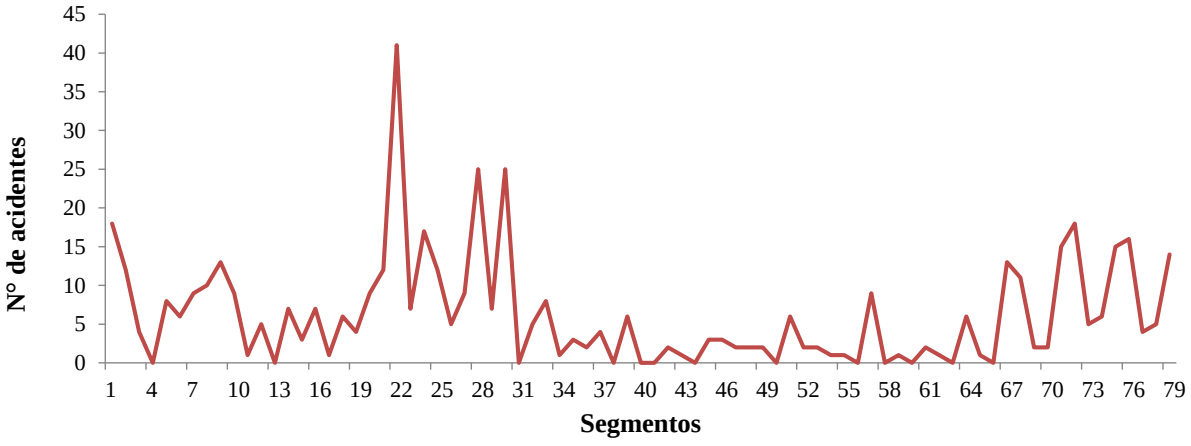

Figura 4.7 – Número de acidentes nos segmentos

Na Tabela 4.5 são apresentados os números de acidentes associados aos diversos grupos considerados, os quais são representados graficamente na Figura 4.8.

Tabela 4.5 – Número de acidentes nos grupos de segmentos

Grupo	Acidentes observados	Grupo	Acidentes observados	Grupo	Acidentes observados	Grupo	Acidentes observados
1	26	6	7	11	123	16	5
2	14	7	17	12	96	17	9
3	21	8	15	13	61	18	12
4	17	9	8	14	16	19	18
5	7	10	16	15	6	20	0

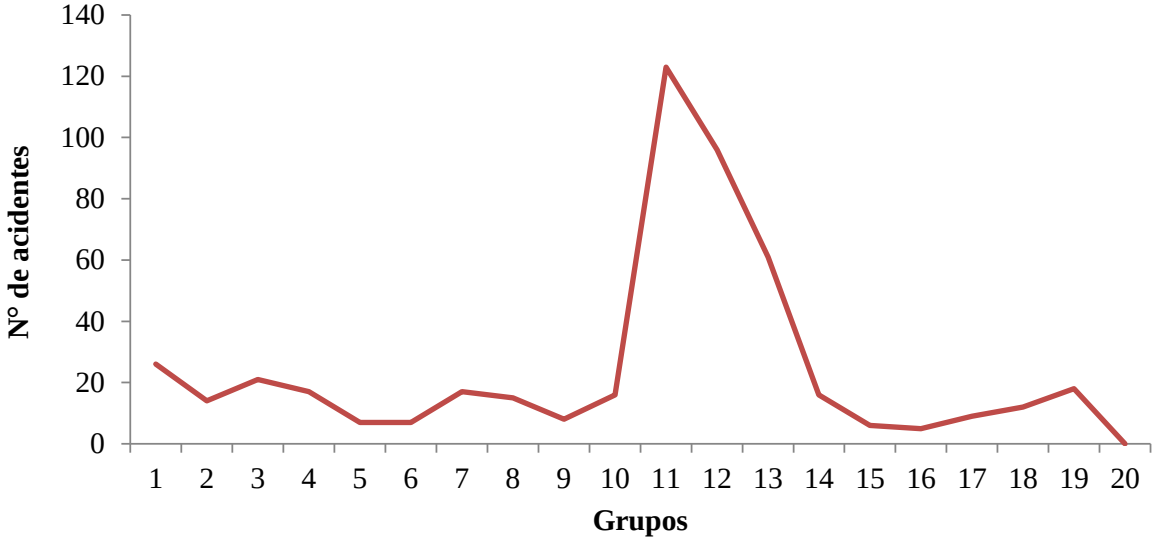

Figura 4.8 – Número de acidentes nos grupos de segmentos

Na Figura 4.9 é mostrada a distribuição do número de segmentos (absoluto e relativo) associados a distintas quantidades de acidentes, considerando o total dos três anos (2008, 2009 e 2010).

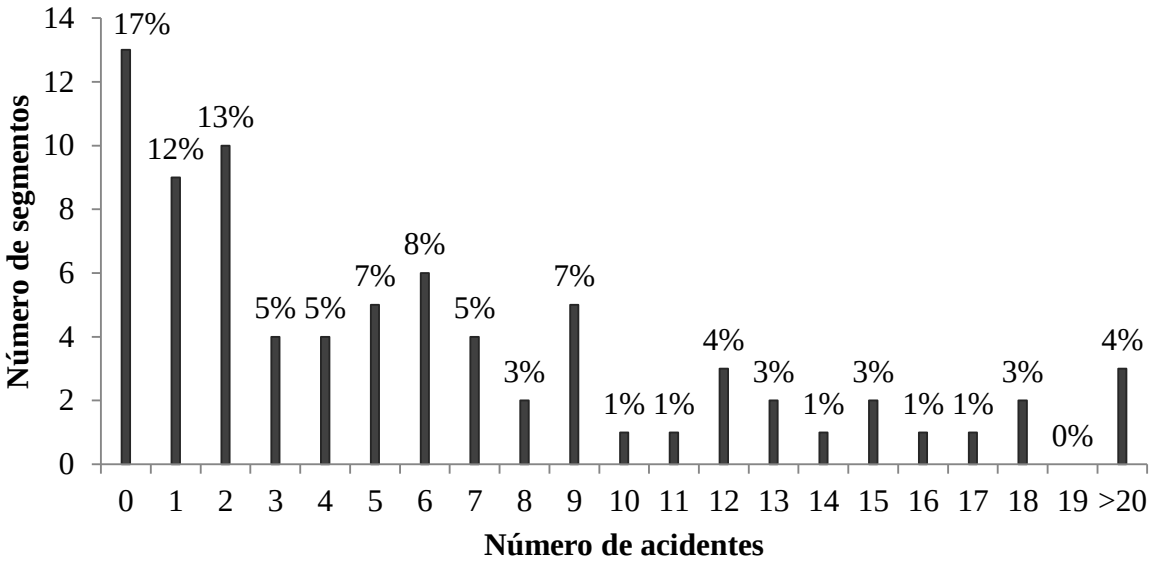

Figura 4.9 – Distribuição do número de segmentos associados às distintas quantidades de acidentes

Distribuição percentual dos acidentes por severidade

Na Figura 4.10 é mostrada graficamente a distribuição percentual nos segmentos analisados dos seguintes tipos de acidentes: (1) Com vítimas fatais; (2) Com vítimas com ferimentos graves; (3) Com vítimas com ferimentos moderados; (4) Com vítimas com ferimentos leves e (5) Sem vítimas (apenas com danos materiais).

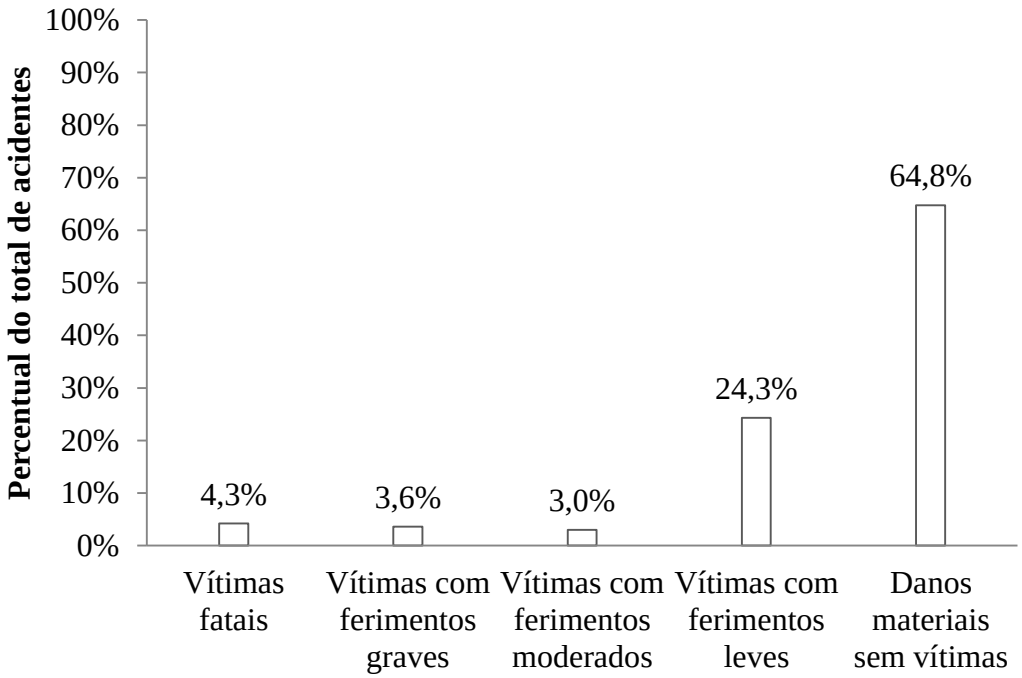

Figura 4.10 – Distribuição percentual de acidentes por severidade

Distribuição percentual dos acidentes por tipo e severidade

Na Tabela 4.6 estão indicados os valores associados aos diversos tipos de acidentes e a severidade correspondente.

Tabela 4.6 – Distribuição percentual dos acidentes nos segmentos analisados por tipo e severidade

Tipo de acidente	Grau de severidade (%)		
	Acidentes com vítimas	Danos Materiais	Total
Acidente envolvendo apenas um veículo			
Atropelamento de animal	2,9%	8,8%	6,7%
Atropelamento de pedestre	3,4%	0,3%	1,0%
Saída de pista [b]	42,3%	27,2%	32,5%
Outros	1,7%	30,9%	20,6%
Total (apenas um veículo)	50,3%	67,2%	61,2%
Acidente envolvendo mais de um veículo			
Colisão transversal	12,6%	5,6	8,1
Colisão frontal	9,1%	0,6	3,6
Colisão traseira	16,0%	9,4	11,7
Colisão lateral	6,9%	7,2	7,1
Engavetamento	0,6%	1,9	1,4
Outros	3,4%	8,1	6,5
Total (mais de um veículo)	48,6%	32,8%	38,4%
Total de acidentes	100	100	100

[b]Os acidentes classificados como saída de pista envolvem choque com obstáculos situados na lateral da via, tombamento e capotamento.

Distribuição percentual de acidentes por período do dia e no período noturno

A proporção de acidentes noturnos nos segmentos não iluminados é mostrada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Proporção de acidentes noturnos em segmentos não iluminados

Acidentes noturnos em segmentos não iluminados	Proporção
Fatais e com vitimas (p_{inr})	0,412
Apenas danos materiais (p_{pnr})	0,588
Acidentes noturnos em relação ao valor total (p_{nr})	0,392

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO HSM

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO ORIGINAL DO HSM

Para a aplicação do modelo do HSM, foi desenvolvida neste trabalho uma ferramenta em ambiente *Excel/Visual Basic for Applications*, com o objetivo de organizar as informações coletadas, apresentada no Apêndice A – *Crash Analysis Tool*. Foram inicialmente determinados os valores de *CMF* para cada característica dos diversos segmentos nos três anos analisados e adotado valor de C_r igual a 1,00.

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo original nos 79 segmentos, os quais são representados graficamente na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Número de acidentes previstos nos segmentos

Seg.	Acidentes previstos	Seg.	Acidentes previstos	Seg.	Acidentes previstos	Seg.	Acidentes previstos
1	2,07	21	3,61	41	0,48	61	1,07
2	4,92	22	6,22	42	0,20	62	0,66
3	0,35	23	0,88	43	0,43	63	1,43
4	1,32	24	2,95	44	0,59	64	1,90
5	2,17	25	0,70	45	0,54	65	1,60
6	1,66	26	0,47	46	2,20	66	1,02
7	3,50	27	1,04	47	1,11	67	5,94
8	3,79	28	2,98	48	1,01	68	1,59
9	7,16	29	0,74	49	0,57	69	0,57
10	2,53	30	4,35	50	0,26	70	0,64
11	1,87	31	0,37	51	1,18	71	1,70
12	2,66	32	0,59	52	0,49	72	4,32
13	0,89	33	1,92	53	1,29	73	2,21
14	2,20	34	0,62	54	0,79	74	1,44
15	1,63	35	0,26	55	0,79	75	2,98
16	2,59	36	0,81	56	1,26	76	2,01
17	0,69	37	0,65	57	1,87	77	0,96
18	1,87	38	0,33	58	0,97	78	1,18
19	0,73	39	1,58	59	0,79	79	3,47
20	1,82	40	0,47	60	1,09	Total	132,57

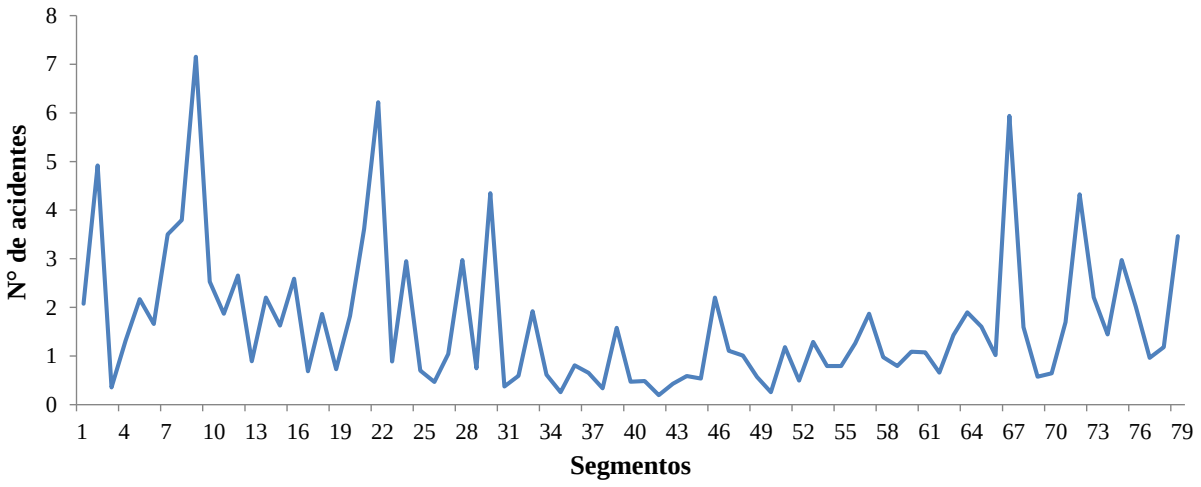

Figura 5.1 – Número de acidentes previstos nos segmentos

Os números de acidentes para os grupos de segmentos são indicados na Tabela 5.2 e representados graficamente na Figura 5.2.

Tabela 5.2 – Número de acidentes previstos nos grupos

Grupo	Acidentes previstos	Grupo	Acidentes previstos	Grupo	Acidentes previstos	Grupo	Acidentes previstos
1	6,36	6	3,53	11	40,29	16	2,21
2	3,47	7	2,95	12	14,01	17	1,82
3	5,96	8	2,98	13	24,40	18	0,70
4	7,51	9	2,17	14	2,01	19	4,32
5	0,88	10	4,25	15	1,44	20	1,32

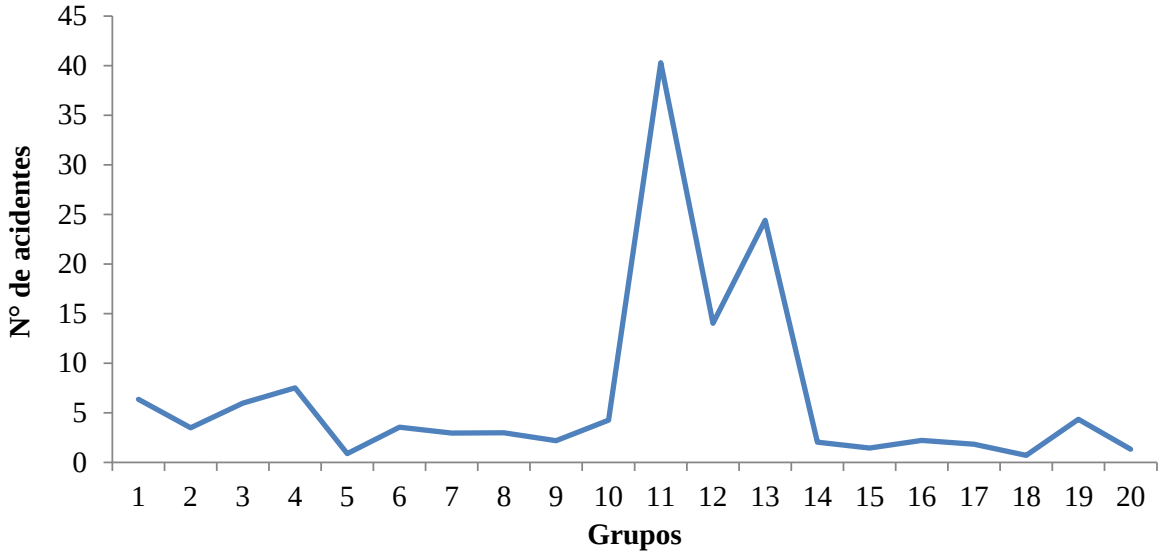

Figura 5.2 – Número de acidentes previstos nos grupos

Vale observar que o número de acidentes previsto no método original (132,57) é bastante menor que o número de acidentes observado (494). Isso mostra que o método original não representa adequadamente a realidade no universo estudado.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO DO HSM CALIBRADO

5.2.1 FATOR DE CALIBRAÇÃO

O fator de calibração (C_r) obtido por intermédio da equação 3.14 foi de 3,73.

5.2.2 NÚMERO DE ACIDENTES PREVISTOS PELO MODELO CALIBRADO

Os números de acidentes previstos pelo modelo calibrado para cada um dos 79 segmentos estão relacionados na Tabela 5.3, os quais são representados graficamente na Figura 5.3

Tabela 5.3 – Número de acidentes previstos pelo modelo calibrado nos segmentos

Seg.	Acidentes previstos	Seg.	Acidentes previstos	Seg.	Acidentes previstos	Seg.	Acidentes previstos
1	7,73	21	13,47	41	1,80	61	4,00
2	18,33	22	23,18	42	0,73	62	2,45
3	1,31	23	3,30	43	1,60	63	5,33
4	4,91	24	11,00	44	2,19	64	7,06
5	8,09	25	2,61	45	2,00	65	5,97
6	6,18	26	1,74	46	8,20	66	3,80
7	13,05	27	3,87	47	4,12	67	22,14
8	14,14	28	11,09	48	3,76	68	5,94
9	26,67	29	2,77	49	2,11	69	2,13
10	9,43	30	16,21	50	0,95	70	2,40
11	6,97	31	1,39	51	4,40	71	6,32
12	9,89	32	2,20	52	1,84	72	16,11
13	3,33	33	7,16	53	4,80	73	8,22
14	8,21	34	2,30	54	2,96	74	5,38
15	6,06	35	0,95	55	2,96	75	11,09
16	9,66	36	3,00	56	4,69	76	7,51
17	2,56	37	2,43	57	6,96	77	3,58
18	6,95	38	1,24	58	3,63	78	4,41
19	2,71	39	5,88	59	2,96	79	12,92
20	6,79	40	1,76	60	4,05	Total	494

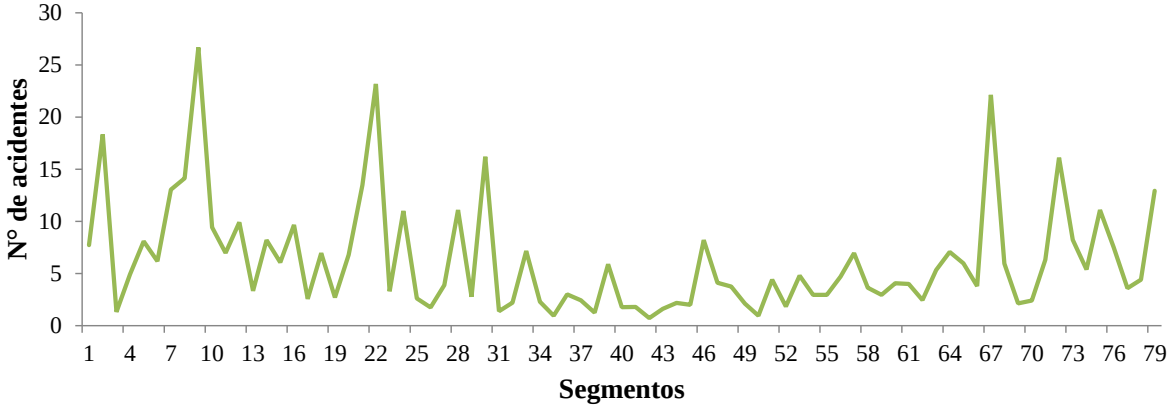

Figura 5.3 – Número de acidentes previsto pelo modelo calibrado nos segmentos

O número de acidentes previsto pelo modelo calibrado para os 20 grupos de segmentos é mostrado na Tabela 5.4 e na Figura 5.4.

Tabela 5.4 – Número de acidentes previstos pelo modelo calibrado para os grupos

Grupo	Acidentes previstos	Grupo	Acidentes previstos	Grupo	Acidentes previstos	Grupo	Acidentes previstos
1	23,68	6	13,15	11	150,13	16	8,22
2	12,92	7	11,00	12	52,21	17	6,79
3	22,21	8	11,09	13	90,91	18	2,61
4	27,98	9	8,09	14	7,51	19	16,11
5	3,30	10	15,83	15	5,38	20	4,91

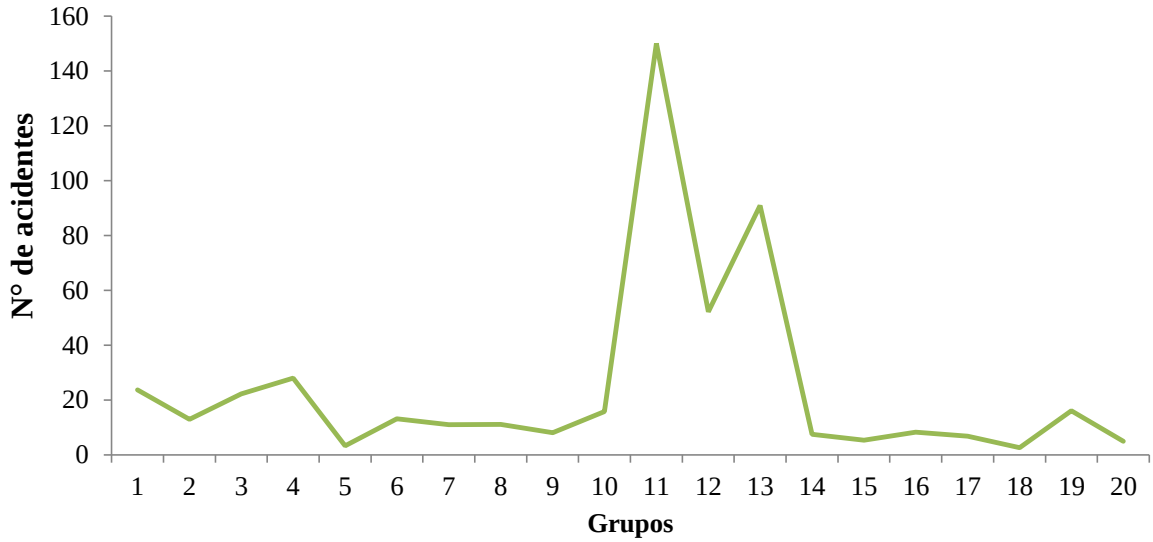

Figura 5.4 – Número de acidentes previsto pelo modelo calibrado para os grupos

Vale notar que os números de acidentes previsto no método calibrado e real são coincidentes.

5.3 Resultados obtidos com a aplicação do método empírico de Bayes

Os números de acidentes esperados mediante a aplicação do método de Bayes encontram-se na Tabela 5.5 e estão representados graficamente na Figura 5.5.

Tabela 5.5 – Número de acidentes previstos com a aplicação do método empírico de Bayes

Seg.	Acidentes esperados	Seg.	Acidentes esperados	Seg.	Acidentes esperados	Seg.	Acidentes esperados
1	12,25	21	12,88	41	1,28	61	3,42
2	15,70	22	29,69	42	1,06	62	1,94
3	2,53	23	4,99	43	1,43	63	3,46
4	2,68	24	13,15	44	1,42	64	6,73
5	8,05	25	5,63	45	2,29	65	4,22
6	6,09	26	2,55	46	6,69	66	2,70
7	10,97	27	5,50	47	3,51	67	18,92
8	12,41	28	14,91	48	3,10	68	7,55
9	20,26	29	4,94	49	2,08	69	2,09
10	9,26	30	18,81	50	0,69	70	2,28
11	3,98	31	0,90	51	4,90	71	9,72
12	7,76	32	3,01	52	1,89	72	16,96
13	2,06	33	7,47	53	3,81	73	6,70
14	7,73	34	1,84	54	2,39	74	5,66
15	4,63	35	1,53	55	2,39	75	12,84
16	8,59	36	2,71	56	3,04	76	11,19
17	1,99	37	3,18	57	7,55	77	3,76
18	6,56	38	0,88	58	2,35	78	4,67
19	3,40	39	5,92	59	2,39	79	13,40
20	7,75	40	1,14	60	2,63	Total	491,35

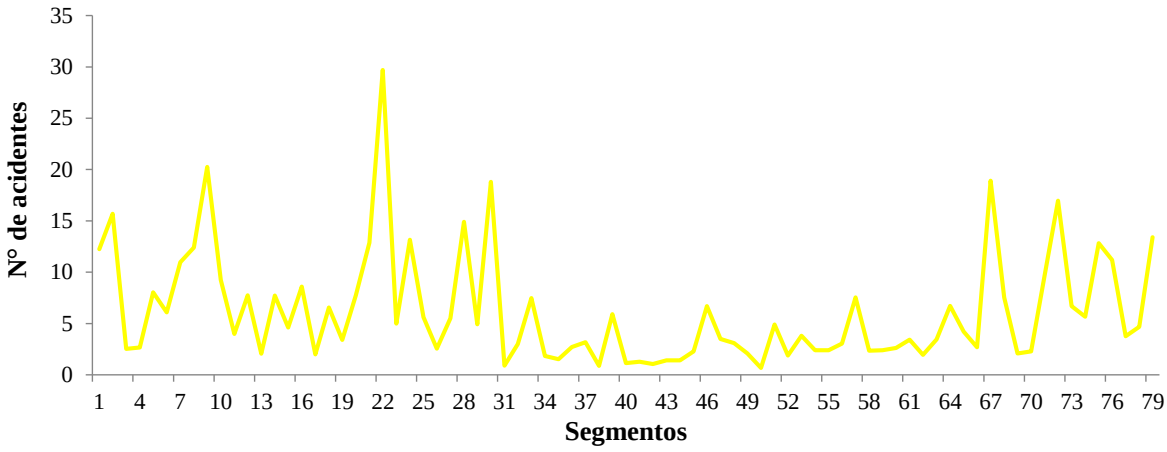

Figura 5.5 – Número de acidentes esperado em cada segmento

Os números de acidentes para os grupos de segmentos são mostrados na Tabela 5.6 e na Figura 5.6.

Tabela 5.6 – Número de acidentes previstos para os grupos com a aplicação do método EB

Grupo	Acidentes esperados	Grupo	Acidentes esperados	Grupo	Acidentes esperados	Grupo	Acidentes esperados
1	24,64	6	10,08	11	140,57	16	6,70
2	13,40	7	13,15	12	65,96	17	7,75
3	21,20	8	12,84	13	81,21	18	5,63
4	22,80	9	8,05	14	11,19	19	16,96
5	4,99	10	15,91	15	5,66	20	2,68

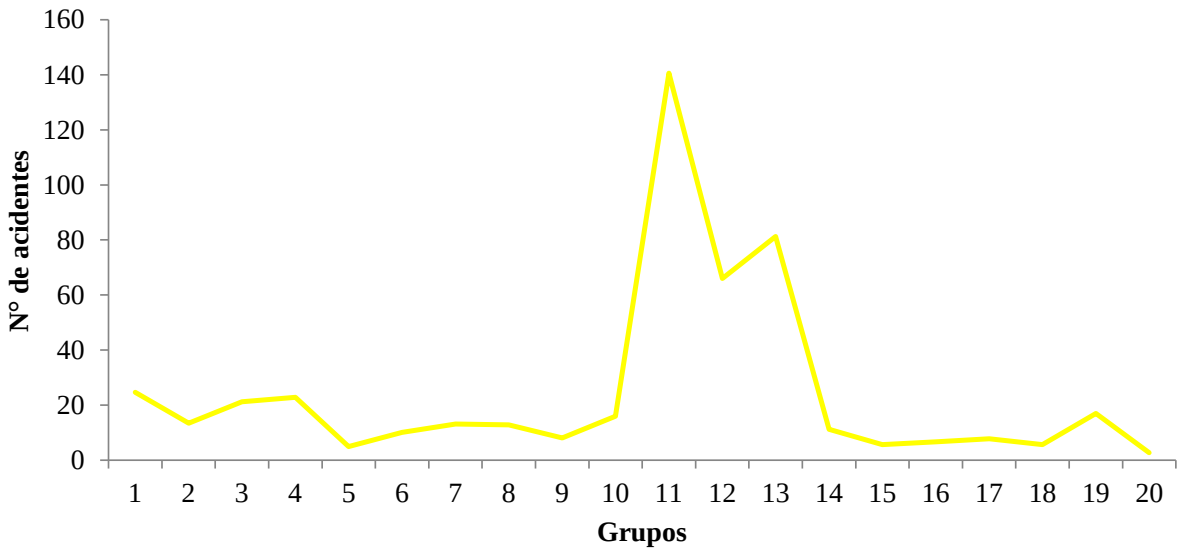

Figura 5.6 – Número de acidentes esperado em cada grupo

O número total de acidentes esperado com a aplicação do método empírico de Bayes é igual a 491,35, ligeiramente menor do que o número total de acidentes observados (494).

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.4.1 AVALIAÇÃO GRÁFICA

Na Figura 5.7 são mostrados no gráfico os números de acidentes nos diferentes métodos para os 79 segmentos.

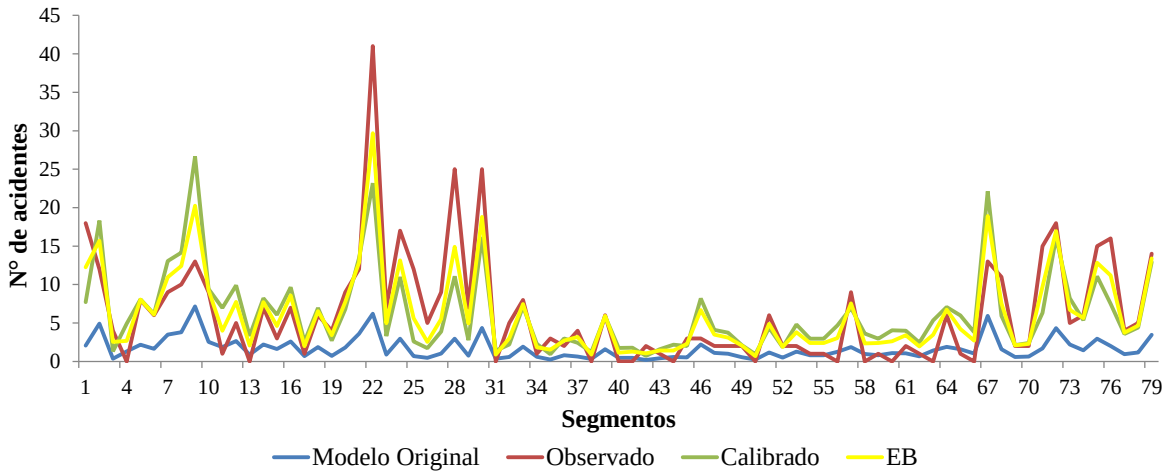

Figura 5.7 – Número de acidentes nos segmentos

Na Figura 5.8 são mostrados os números de acidentes obtidos nos diferentes métodos para os 20 grupos de segmentos.

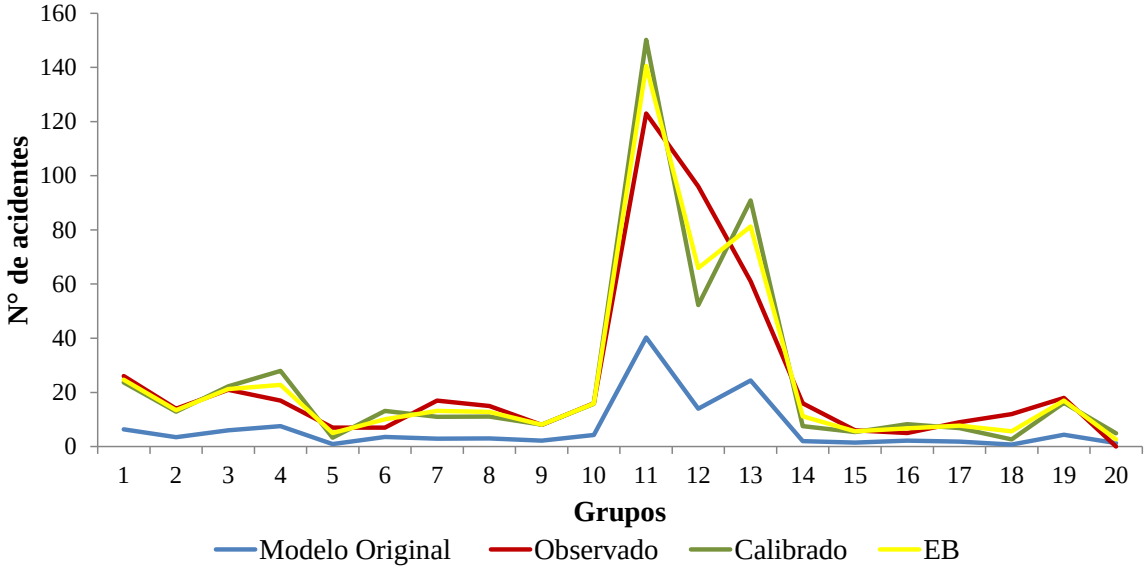

Figura 5.8 – Número de acidentes nos grupos de segmentos

A análise das Figuras 5.7 e 5.8 permite inferir o seguinte:

- O modelo original não representa satisfatoriamente a realidade;
- O modelo calibrado representa satisfatoriamente a realidade;
- Com a aplicação do método empírico de Bayes utilizando como referência o modelo calibrado os resultados obtidos representam ainda melhor a realidade, como era esperado.

5.4.2 Avaliação da correlação

A avaliação da correlação entre os números de acidentes em cada segmento, ou grupo, previstos e observados foi realizada utilizando a técnica de regressão linear simples. Não foram considerados na análise os valores obtidos pelo modelo original, por terem se mostrado em desacordo com a realidade.

Na Figura 5.9 é mostrada a correlação entre os números de acidentes observados e previstos pelo modelo calibrado, considerando os diversos segmentos.

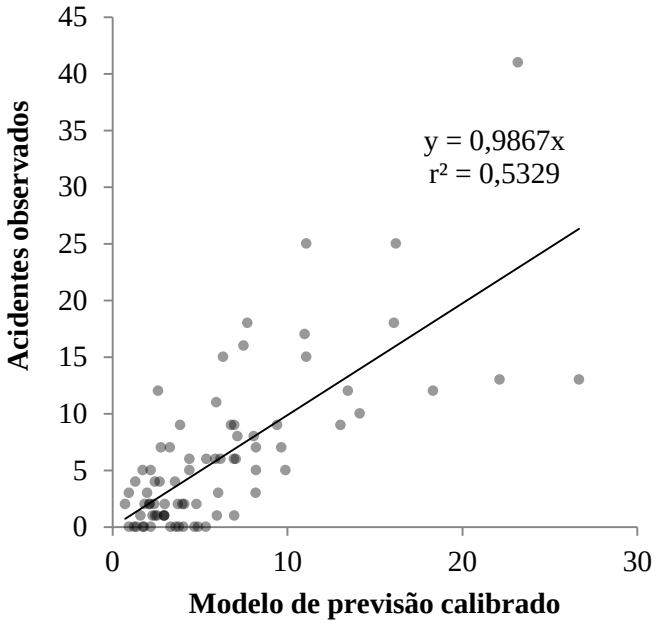

Figura 5.9 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado *versus* Acidentes observados

Na Figura 5.10 é mostrada a correlação entre os números de acidentes observados e previstos pelo método de Bayes, considerando os diversos segmentos.

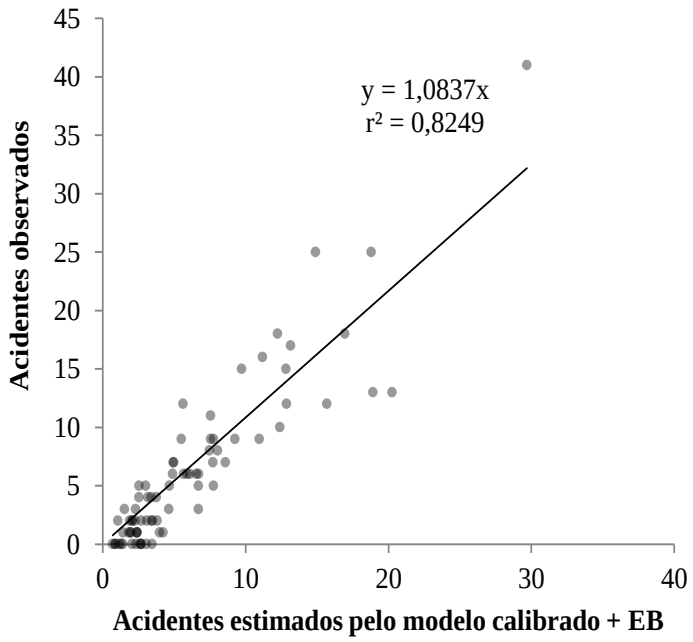

Figura 5.10 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado + EB *versus* Acidentes observados para os segmentos

Na Figura 5.11 é mostrada a correlação entre os números de acidentes observados e previstos pelo modelo calibrado, considerando os grupos de segmentos.

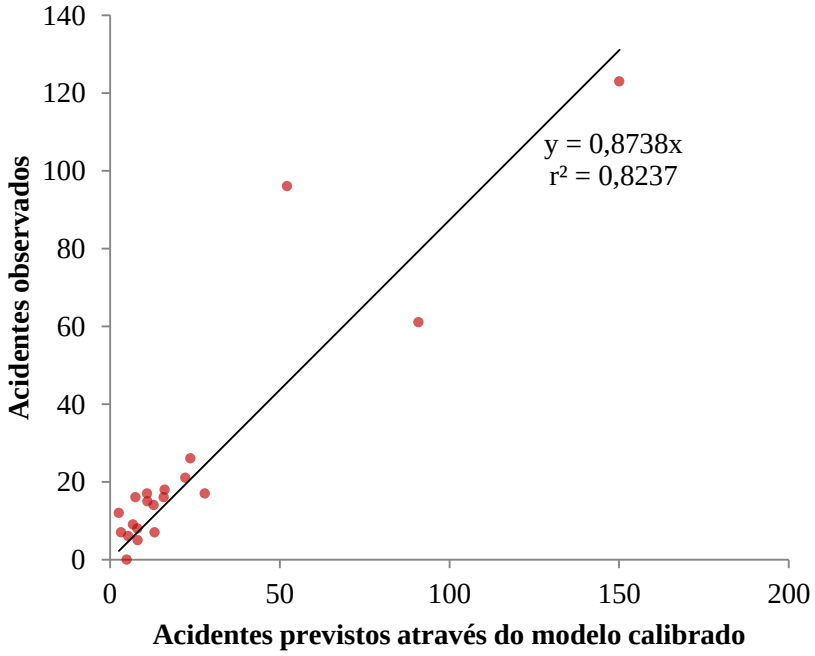

Figura 5.11 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado *versus* Acidentes observados para os grupos

Na Figura 5.12 é mostrada a correlação entre os números de acidentes observados e previstos pelo método empírico de Bayes, considerando os grupos de segmentos.

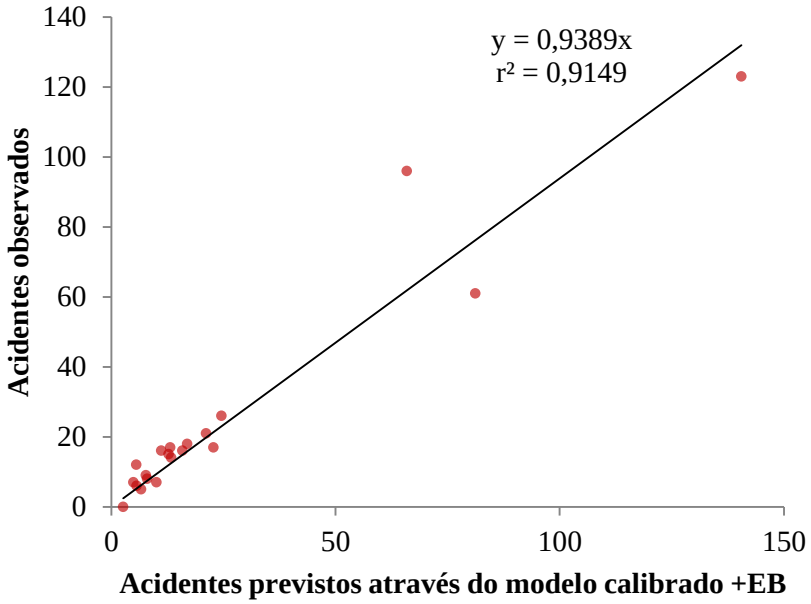

Figura 5.12 – Acidentes previstos pelo modelo calibrado +EB *versus* Acidentes observados para os grupos

Com base nas Figuras 5.9 a 5.12 pode-se inferir o seguinte:

- O coeficiente de determinação igual a 0,5329, que corresponde a um coeficiente de correlação igual a 0,73, obtido no caso da Figura 5.9, indica que existe correlação que pode ser considerada como regular entre o número de acidentes previstos pelo modelo calibrado e o número de acidentes observados quando considerados os segmentos isoladamente;
- O coeficiente de determinação igual a 0,8249, que corresponde a um coeficiente de correlação igual a 0,91, obtido no caso da Figura 5.10, indica que existe uma boa correlação entre o número de acidentes previstos pelo modelo calibrado, refinado pelo método empírico de Bayes, e o número de acidentes observados quando considerado os segmentos isoladamente;
- Quando considerado os grupos de segmentos, o coeficiente de determinação igual a 0,8237, que corresponde a um coeficiente de correlação igual a 0,91, obtido no caso da Figura 5.11, indica que existe uma boa correlação entre o número de acidentes previstos pelo modelo calibrado e o número de acidentes observados;

- Quando considerado os grupos de segmentos, o coeficiente de determinação igual a 0,9149, que corresponde a um coeficiente de correlação, igual a 0,96, obtido no caso da Figura 5.12, indica que existe uma ótima correlação entre o número de acidentes previstos pelo modelo calibrado, refinado pelo método empírico de Bayes; e o número de acidentes observados;
- Conclusão: o modelo calibrado pode perfeitamente ser utilizado no universo analisado para se efetuar a previsão do número de acidentes; sendo os resultados ainda melhores quando empregado o método de Bayes.

5.4.3 Avaliação da distribuição

Na avaliação de aderência da distribuição de acidentes nos segmentos, os segmentos foram agrupados por quantidade de acidentes. A aderência entre os dados reais e teóricos foi avaliada utilizando os testes estatísticos Chi-quadrado e Kolmogorov-Smirnov.

Os segmentos foram divididos em nove faixas de acidentes, como mostrado na Figura 5.13, seguindo as recomendações teóricas pertinentes.

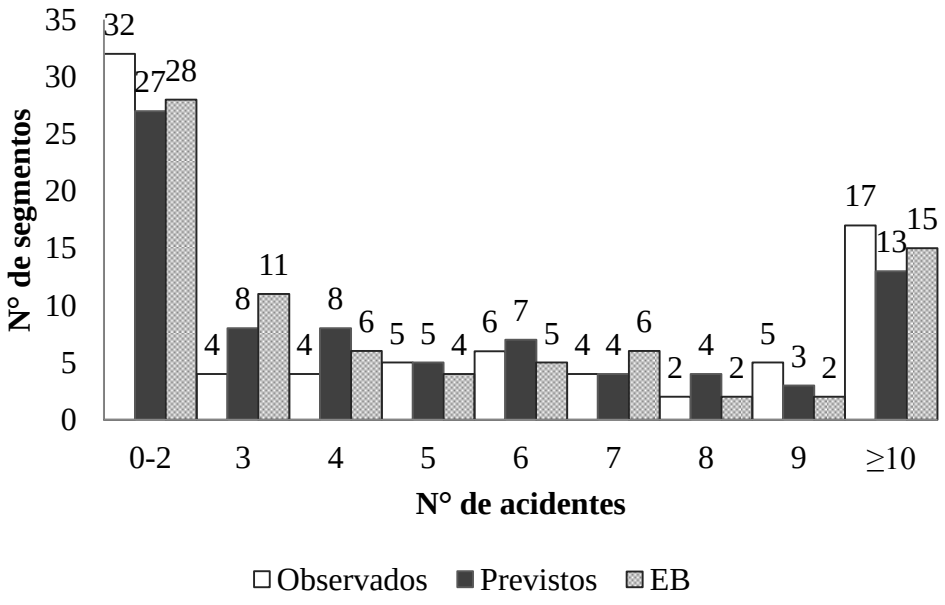

Figura 5.13 – Número de segmentos associados as diversas quantidades de acidentes

Teste de Chi-quadrado

O valor de Chi-quadrado (χ^2) obtido com base nos valores da Figura 5.13 foram os seguintes:

- χ^2 para o método calibrado igual a 8,63;
- χ^2 para método empírico de Bayes igual a 11,58;

Considerando um nível de significância igual a 0,05 e sete graus de liberdade (nove classes menos um grau perdido pela igualdade do número de eventos e menos 1), resulta:

- χ^2 teórico igual a 14,07;

Como os valores de χ^2 obtidos são inferiores ao teórico, com 95% de certeza não se pode rejeitar a hipótese de que a distribuição associada ao modelo calibrado e a distribuição associada ao método empírico de Bayes representam a realidade.

Teste de Kolmogorov-Smirnov

O valor de $D_{máx}$ obtido com base nos valores da Figura 5.13 foram os seguintes:

- $D_{máx}$ para o modelo calibrado igual a 0,076;
- $D_{máx}$ para o método empírico de Bayes igual a 0,063;

Considerando um nível de significância igual a 0,05 e que existem 79 eventos, resulta:

- $D_{máx}$ teórico igual a 0,15;

Como os valores de $D_{máx}$ obtidos são inferiores ao teórico, com 95% de certeza não se pode rejeitar a hipótese de que a distribuição associada ao modelo calibrado e a distribuição associada ao método de Bayes representam a realidade.

5.4.4 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO POR TIPO DE ACIDENTE

Distribuição percentual dos acidentes por severidade

Na Figura 5.14 são mostrados os valores correspondentes à distribuição percentual *default* dos acidentes quanto à severidade fornecidos pelo HSM original e observados no universo analisado.

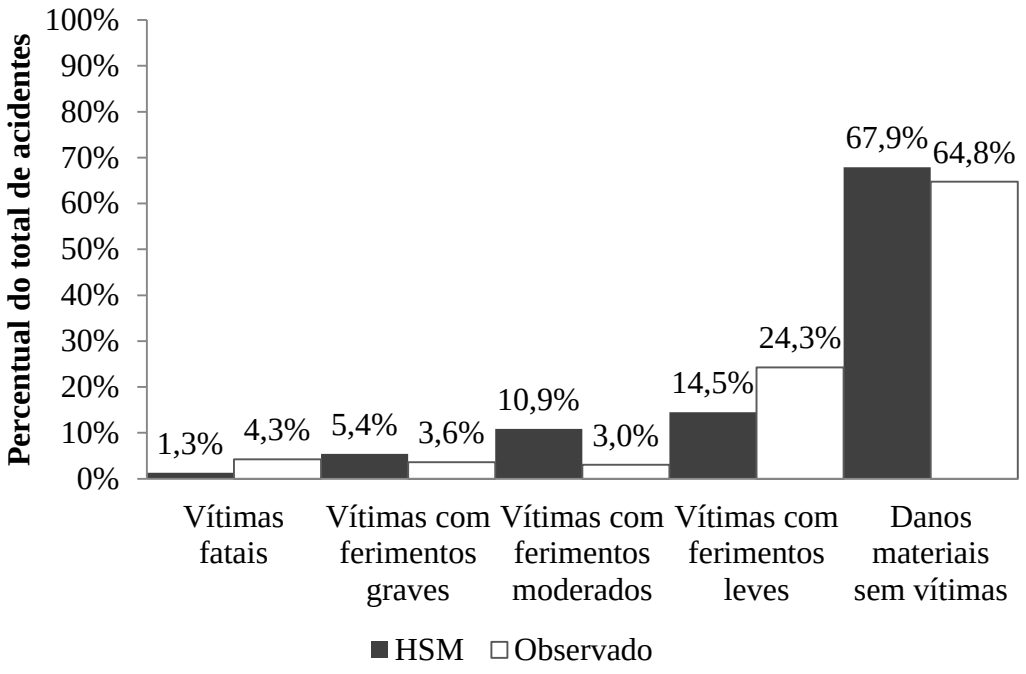

Figura 5.14 – Distribuição dos acidentes por severidade: HSM e observada

Na Figura 5.15 são mostrados os valores da distribuição dos acidentes para uma classificação mais agregada dos dados.

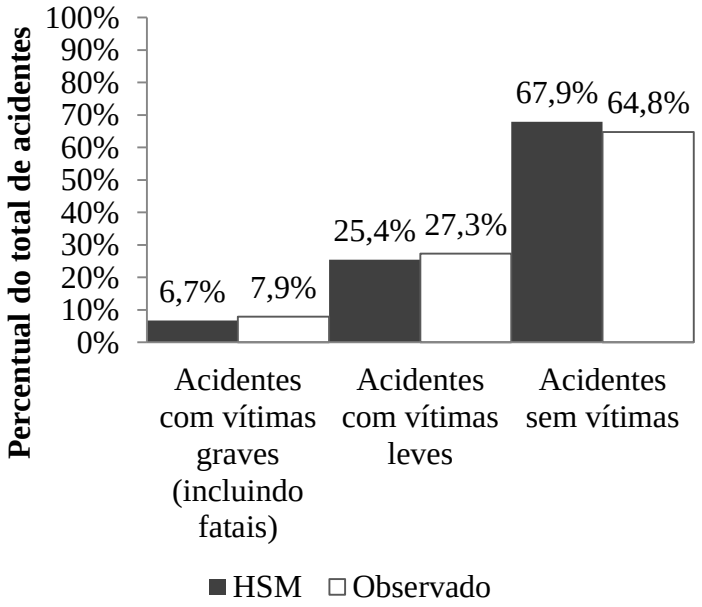

Figura 5.15 – Distribuição agregada dos acidentes por severidade: HSM e observada

A análise da Figura 5.15 mostra que a distribuição preconizada pelo HSM e a distribuição observada apresentam valores bastante próximos nas diversas categorias correspondentes no caso da classificação da severidade com apenas três grupos: acidentes com vítimas graves

(incluindo fatais), acidentes com vítimas leves e acidentes sem vítimas. Quando se consideram os valores desagregados em cinco grupos (caso da Figura 5.14) observam-se algumas diferenças significativas nos valores correspondentes das diversas categorias.

Distribuição percentual dos acidentes por tipo

Na Figura 5.16 são mostrados os valores correspondentes à distribuição percentual dos acidentes quanto ao tipo fornecidos pelo HSM e observados no universo analisado.

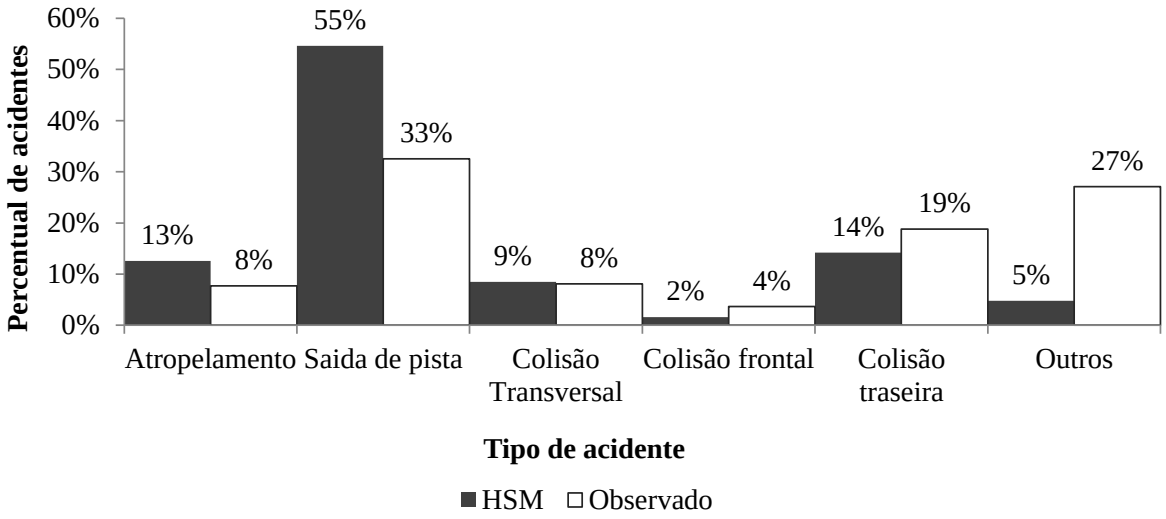

Figura 5.16 – Distribuição dos acidentes por tipo: HSM x Observada

A análise da Figura 5.16 mostra que há diferenças significativas entre os valores correspondentes às seguintes categorias: saída de pista, colisão frontal e outros (que tem um valor grande no universo estudado, indicando que a qualidade das informações de acidentes é significativamente pior no Brasil em relação aos Estados Unidos).

Distribuição percentual de acidentes por período do dia e no período noturno

Na Figura 5.17 são confrontados os valores dos tipos de acidentes por período do dia e, no período noturno, a distribuição considerando à severidade.

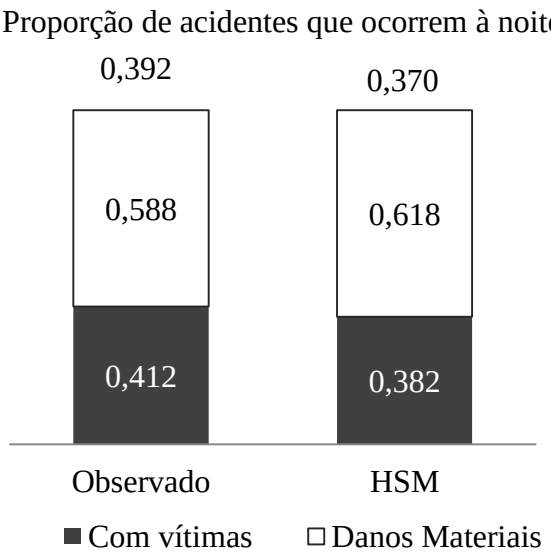

Figura 5.17 – Distribuição dos acidentes por período e por severidade no período noturno: HSM original e observada

Os valores *default* do HSM e observados no universo analisado são bastante próximos.

5.5 *SAFETY PERFORMANCE FUNCTION* PARA O UNIVERSO ANALISADO

A *Safety Performance Function* é definida com a função de desempenho de segurança, também considerada como o DNA de segmentos com condições base. Esse desempenho é uma variável abstrata que é medida empiricamente e usa-se de inferência estatística para indicar que o perfil da acidentalidade do presente será o mesmo do futuro. Por isso, ela deve ser calibrada, segundo indicação da AASHTO (2010) e outros autores (HARWOOD, et al. 2000; XIE, et al. 2011) a cada três anos.

Para o universo analisado neste trabalho, a equação calibrada (ver item 3.7.2) é a seguinte (a equação original do HSM também é colocada para efeito de comparação):

AASHTO (2010)

$$N_{SPFrs} = VDMA \times \frac{L}{1{,}609} \times 365 \times 10^{-6} \times e^{\mathbf{-0{,}312}} \qquad 5.1$$

Universo analisado

$$N_{SPF\,rs} = VDMA \times \frac{L}{1{,}609} \times 365 \times 10^{-6} \times e^{\mathbf{1{,}003}} \qquad 5.2$$

em que:

N_{SPFrs} : número de acidentes previsto para condições base de segmentos de rodovia;

VMDA: volume de tráfego diário médio anual (veículos/dia);

L: extensão segmento analisado convertido em km;

Alternativamente pode-se mudar apenas o coeficiente de calibração *Cr*. No entanto, é mais interessante modificar os parâmetros da *SPF* para que futuramente novas calibrações possam ser realizadas. Na pesquisa desenvolvida não se propôs nenhuma alteração aos *CMF's*.

Com o intuito de facilitar a aplicação do modelo calibrado para o universo analisado, bem como para o modelo refinado utilizando o método de Bayes, na previsão de acidentes em segmentos associados aos diversos grupos considerados no estudo, optou-se pela apresentação do número de acidentes previstos por meio da seguinte equação:

$$N_{previsto} = VDMA \times L \times F \times 10^{-6} \qquad 5.3$$

em que:

$N_{previsto}$: número previsto de acidentes para um determinado ano e local do tipo *x*;

VMDA: volume de tráfego diário médio anual (veículos/dia);

L: extensão segmento analisado convertido em km;

$F \ X \ 10^{-6}$: Fator mulplicativo para cada grupo de segmentos (incorporando $N_{SPF\ rs}$ e *CMF's*). Na Tabela 5.7 são fornecidos valores do fator F.

Tabela 5.7 – Valores do fator F

Grupo	F x 10^{-6}	
	$F_{calibrado}$	F_{Bayes}
1	479,14	498,42
2	577,11	598,69
3	476,91	455,22
4	523,85	426,82
5	500,16	756,71
6	582,72	446,45
7	530,73	634,78
8	580,36	671,84
9	539,47	536,67
10	770,85	774,81
11	419,92	393,19
12	379,91	479,91
13	522,38	466,69
14	549,99	819,80
15	597,39	628,61
16	640,93	522,57
17	457,97	522,73
18	449,66	970,80
19	590,21	621,46
20	496,40	270,72

Essa simplificação pressupõe que para segmentos com características semelhantes às relacionadas em cada grupo, seria possível aplicar um único fator multiplicativo (F x 10-6) ao volume de tráfego médio anual e ao comprimento do segmento considerado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo mostram que os números de acidentes observados nos trechos de rodovias de pista simples do estado de São Paulo analisados são diferentes dos encontrados em rodovias norte-americanas e, portanto, que o modelo apresentado no HSM deve ser aplicado somente após a calibração, como, aliás, é preconizado no manual. Na pesquisa desenvolvida não se propôs nenhuma alteração aos *CMF's*.

O número de acidentes previsto pelo modelo original do HSM é 3,73 vezes menor que o número de acidentes real. A calibração pode ser feita modificando o valor de C_r ou de β. Optou-se neste trabalho pela apresentação das duas formas, uma vez que a modificação dos parâmetros da *SPF* permite novas calibrações a partir dessa. O modelo calibrado fornece valores relativamente próximos dos observados, expressando, assim, satisfatoriamente a realidade no universo analisado. Ainda, melhores resultados são obtidos com a aplicação do método empírico de Bayes.

Esta pesquisa limitou-se a adaptar o HSM para trechos de rodovias de pista simples localizadas no interior do estado de São Paulo. Com a utilização de uma base de dados com maior amplitude geográfica no estado de São Paulo, poderia ser obtida uma equação de previsão de acidentes em rodovias de pista simples que reproduza ainda melhor a realidade desse estado.

Como o Brasil é um país com diferenças regionais acentuadas, é recomendável o desenvolvimento de estudos específicos para se obter equações de previsão de acidentes para cada região ou estado. Na ausência de estudos específicos, as equações de previsão desenvolvidas neste trabalho podem ser utilizadas em outras regiões com a precaução de saber que se trata de aproximação grosseira da realidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.* 5ª. Washington, D. C.: American Association of State and Highway Transportation Officials, 2004.

—. *Highway safety manual.* 1ª. Washington: American Association of State and Highway Transportation Officials, 2010.

AGUERO-VALVARDE, J., e P.P. JOVANIS. "Bayesian multivariate poisson log-normal models for crash severity modeling and site ranking." *Paper Presented at the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board.* Washington, D. C., 2009.

AUTOVIAS. *Autovias - Grupo OHL.* s.d. http://www.autovias.com.br/ (acesso em agosto de 2011).

BANIHASHEMI, M. "Highway Safety Manual, new model parameters vs. calibration of crash prediction models." *Compendium of the 90th Annual Meeting of the Transportation.* Washington, DC: Transportation Research Board, 2011.

BASTOS, J. T. *Geografia da mortalidade no trânsito no Brasil.* Dissertação de Mestrado, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010, 146 p.

BORTKIEWICS, L. von. *Das Gezetz der kleinen Zahlen (The law of small numbers).* Leipzig, 1898.

DNIT. "Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes." *Anuário estatístico de acidentes de trânsito.* 2011. Disponível em <http://www.dnit.gov.br/> (acesso em Março de 2011).

ELVIK, R. "The predictive validity of empirical Bayes estimates of road safety." *Accident Analysis & Prevention, 40(6)*, 2008: 1964-1969.

ELVIK, R., A. HOYE, T. VAA, e M. SORENSEN. *The handbook of road safety measures.* 2ª. Bingley: Emerald, 2009.

EVANS, L. *Traffic Safety.* Bloomfield: Science Serving Society, 2004.

FARR, T. G. et al. “The Suttle Radar Topography Mission, Ver. Geophys., 45, RG2004.” 2007. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html> (acesso em Outubro de 2011).

FERRAZ, A. C., A. A RAIA JR, e B. S BEZERRA. *Segurança no trânsito.* São Carlos: Grupo Gráfico São Francisco, 2008.

GOOGLE. *Google Earth.* 2011. http://www.google.com/earth/index.html (acesso em Setembro de 2011).

GREENWOOD, M., e G. U. YULE. “An inquiery into the nature of frequency distributilns representative of multiple happenings, with particular reference to the occurence of multiple attacks of dicease and repeated accidents.” *Journal of the Royal Statistical Society, 83*, 1920: 255-279.

GRIFFIN, L. I., e K.K. MAK. *The Benefits to Be Achieved from Widening Rural, Two lane Farm-to-Market Roads in Texas.* Report N° IAC(86-87), College Station: Texas Transportation Institute, 1987.

HANNON, J. J., e T. SULBARAN. *Information Technology for Efficient Project Delivery.* NCHRP Synthesis 385., Washington, D.C: Transportation Research Board, 2008.

HARWOOD, D.W., COUNCILl F.M., E. HAUER, W.E. HUGHES, e VOGT A. *Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways.* FHWA-RD-99-207, Office of Safety Research and Development, Federal Highway Administration, 2000.

HAUER, E. *Observational before-after studies in road safety.* Bingley: Emerald, 2007.

IBGE. “Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.” *Estatísticas.* 2006. Disponível em <http://www.ibge.gov.br> (acesso em Maio de 2009).

JACOBS, G, A AERON, e A. ASTRO. *Estimating global road fatalities.* TRL Report 445, Londres: Transport Research Laboratory for International Development, 2000, 40 p.

LAN, B., B. PERSAUD, e C., BHIM, R. LYON. “Validation of a full Bayes methodology for observational before-after road safety studies and application to evaluation of rural signal conversions.” *Accident Analysis & Prevention, 41(3)*, 2009: 574-580.

LORD, D. “Modeling motor vehicle crashes using Poisson-gamma models: examining the effects of low sample mean values and small sample size on.” *Accident Analysis and Prevention 38 (4),* 2006: 751–766.

LORD, D., PERSAUD, B.N. “Accident prediction models with and without trend: application of the generalized estimating equations procedure.” *Transportation Research Record 1717,* 2000: 102–108.

MIAOU, S. -P. *Vertical greide analyses summary.* não publicado, 1998.

MIAOU, S. -P., e D. LORD. “Modeling traffic crash-flow relationships for intersections: dispersion parameter, functional form, and Bayes versus Empirical Bayes.” *Transportation Research Record 1840,* 2003: 31–40.

NEST-USP. *Núcleo de Estudos de Segurança no Trânsito da Universidade de São Paulo.* 2011. <http://www.stt.eesc.usp.br/nest/> (acesso em Novembro de 2011).

NODARI, C. T. *Método de avaliação da segurança potencial de segmentos rodoviários rurais de pista simples.* Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

RIENTE, G.A., e J. R. A. SETTI. “Método para caracterização e classificação de trechos homogêneos rodoviários.” *Anais do 7° Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões.* Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Concessionaria de Rodovias, 2011.

SUN, X., D. MAGRI, H. H. SHIRAZI, e S. GILLELLLA. “Application of the Highway Safety Manual: Louisiana experience with rural multilane highways.” *Compendium of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting.* Washington, DC: Transportation Research Board, 2011.

TRB. *Highway Capacity Manual 2010.* Washington, D.C: Transportation Research Board, 2010.

UDOT. *Transportation safety data and analysis. Volume 2: Calibration of the Highway Safety Manual and Development of New Safety Performance Functions.* Report No. UT-10.12b, Salt Lake City: Utah Department of Transportation, 2011.

VOGT, A., e J.G. BARED. “Accident Models for Two-Lane Rural Segments and Intersections.” *Transportation Research Record 1635,* 1998.

WILDE, G. J. S. *Target Risk. Dealing with the danger of death, desease and damege in everyday decisions.* Toronto: PDE Publications, 1994.

XIE, F., K. GLADHILL, K. K. DIXON, e C. M. MONSERE. "Calibrating the Highway Safety Manual predictive models for Oregon state Highways." *Compendium of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting.* Washington, DC: Transportation Research Board, 2011.

ZEEGER, C.V., R.C DEEN, e J.G MAYES. *Effect of Lane and Shoulder Width on Accident Reduction on Rural, Two-Lane Roads.* Washington, D. C.: Transportation Research Record 806. National Research Board, 1981.

ZEGEER, C.V., J. R. STEWART, F.M. COUNCIL, D.W. REINFURT, e E. HAMILTON. "Safety Effects of Geometric Improvements on Horizontal Curves." *Transportation Research Record 1356,* 1992.

APÊNDICE A – *CRASH ANALYSIS TOOL* (EM CD-ROM)