

## AVALIAÇÃO DA TRANSFERIBILIDADE DO MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES DO HSM PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Andrey Zuriel Ebeling Bonatto

César Luis Andriola

Christine Tessele Nodari

Daniel Sergio Presta Garcia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Laboratório de Sistemas de Transportes (LASTRAN)

### RESUMO

O Brasil tem muito a realizar na área de prevenção de acidentes e poderia utilizar-se do manual de segurança viária, o Highway Safety Manual (HSM), desenvolvido nos Estados Unidos. Porém, para a utilização das diferentes ferramentas nele contidas é necessário a calibração de um modelo de previsão de acidentes. Apesar de resultados positivos para o contexto brasileiro, a experiência tem mostrado que este modelo pode divergir da real condição de segurança. Para obter uma melhor transferibilidade do modelo do HSM à realidade nacional, este trabalho buscou calibrar o modelo do HSM para um conjunto de rodovias de pista simples do estado do Rio Grande do Sul. Além de diferentes fatores de calibração, foram utilizadas funções de calibração. Os resultados mostraram que a função de calibração apresenta um resultado superior ao uso de fatores de calibração, permitindo uma transferência satisfatória do modelo do HSM.

### ABSTRACT

Brazil has a lot to do in the area of accident prevention and could use the Highway Safety Manual (HSM), developed in the United States. However, in order to use its different tools, it is necessary to calibrate a Safety Performance Function. Despite positive results for the Brazilian context, experience has shown that this model may differ from the real safety condition. To obtain a better transferability of the HSM model to the national reality, this work sought to calibrate the HSM model for a set of single-lane highways in the state of Rio Grande do Sul. In addition to different calibration factors, calibration functions were used. The results showed that the calibration function presents a superior result to the use of calibration factors, allowing a satisfactory transfer of the HSM model.

### 1. INTRODUÇÃO

A Associação Americana de Rodovias Estaduais e Oficiais de Transporte introduziu em 2010 o HSM (Manual de Segurança Viária - *Highway Safety Manual*) (AASHTO, 2010). O manual provê aos profissionais de transporte um recurso de informação quantitativa padronizada a nível nacional para avaliação e análise de acidentes. O HSM fornece conhecimento, técnicas e métodos modernos para a estimativa de frequência e severidade de acidentes futuros, bem como identifica e avalia opções para reduzi-los. A utilização do HSM pode contribuir na gestão da segurança viária no Brasil, país onde os acidentes de trânsito são um dos principais problemas de saúde pública. A elevada taxa de morbimortalidade decorrente dos acidentes viários sobrecarrega o sistema de saúde brasileiro e traz consigo prejuízos sociais e econômicos (Lima *et al.*, 2019).

A aplicação das ferramentas disponíveis no HSM está baseada na utilização de SPFs (*Safety Performance Functions*), conhecidas no Brasil como MPAs (Modelos de Previsão de Acidentes). Trata-se de modelos estatísticos de regressão que permitem prever o número médio de acidentes por tipo e severidade a partir das características de um elemento rodoviário, como por exemplo uma interseção semaforizada ou um segmento rodoviário de pista dupla. Entre as vantagens dos MPAs está o fato de evitar o efeito de Regressão-à-média, permitir a avaliação de impacto de contramedidas e a previsão do número médio de acidentes em instalações ainda em projeto. O HSM ainda orienta a combinação do uso de MPAs com o método Empírico de Bayes para melhorar as previsões dos modelos, pois esse é considerado o estado da arte na análise de acidentes (Elvik, 2010).

O HSM é composto por 4 partes: (i) parte A – Introdução, Fatores Humanos e Fundamentos; (ii) parte B - Procedimento de Gestão da Segurança Viária; (iii) parte C – Métodos Preditivos e (iv) parte D – Fatores Modificadores de Acidentes. A parte C do HSM apresenta um guia para a obtenção de MPAs para diversos tipos de instalações rodoviárias. Entretanto, esses modelos refletem as condições de segurança viária para as rodovias dos Estados Unidos, e para o período em que os modelos foram desenvolvidos. Para que o modelo possa representar as condições de diferentes jurisdições e em períodos diferentes, o manual apresenta uma seção em anexo orientando o processo de calibração. Assim, as jurisdições que não possuam um modelo próprio podem utilizar o modelo do HSM calibrado.

Diferentes estudos apresentam o processo de calibração de MPAs do HSM. Foram estimados fatores de calibração específicos para estados Norte-Americanos, como o caso de Matarage e Dissanayake (2019) para o estado do Kansas e Shin *et al.* (2015) para o estado de Maryland. Calibrações do modelo do HSM na Europa, mostraram uma boa transferência para as rodovias alemãs (Moraldi *et al.*, 2019) e italianas (Russo *et al.*, 2016), enquanto os trabalhos de Sacchi *et al.* (2012) e Russo *et al.* (2014) não apresentaram bons resultados, recomendando que a União Europeia desenvolvesse os seus próprios modelos ao invés de calibrar o modelo proposto no HSM. Mesmo dentro dos Estados Unidos, Qin *et al.* (2016), realizando um estudo para calibrar o HSM para o estado da Dakota do Sul, verificaram ser melhor abandonar a utilização de um fator de calibração e utilizar os modelos desenvolvidos localmente. Resultados parecidos foram obtidos por Kaaf e Abdel-Aty (2015), em que o modelo do HSM mostrou um número significativamente maior de acidentes do que aqueles experienciados na cidade de Riyadh, na Arábia Saudita.

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

Com o objetivo de testar a transferibilidade do MPA do HSM para o contexto brasileiro, em particular para rodovias do estado do Rio Grande do Sul, esse artigo avaliou dois métodos de transferência de modelos: a utilização de múltiplos fatores de calibração e a função de calibração. Foram consideradas apenas rodovias de pista simples, uma vez que essas representam 57.275 km, ou 87,6% da malha federal pavimentada no país (CNT, 2019). Para isso, esse trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o método preditivo do HSM; a seção 3 os métodos de transferência de modelos analisadas; a seção 4 a forma de avaliação do ajuste desses modelos; a seção 5 a base de dados utilizada; a seção 6 os resultados; a seção 7 as discussões, e a seção 8 as considerações finais.

## 2. MÉTODO PREDITIVO DO HSM

Na parte C do HSM, o capítulo 10 apresenta um procedimento estruturado para estimar a frequência média de acidentes esperados ( $N_{\text{previsto}}$ ) por severidade e tipo, para rodovias de pista simples com características conhecidas (AASHTO, 2010). O método é usado para estimar a frequência de acidentes esperados em um local individual. Com a soma acumulada de todos os locais é possível obter uma estimativa de toda uma rede ou de um único elemento. A estimativa, calculada por meio da Equação 1, é dada por um período de tempo de interesse

(em anos) durante o qual as características geométricas e as características do controle de tráfego não se alteraram, e os volumes de tráfego são conhecidos ou previstos.

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

$N_{\text{SPF}}$  é a Frequência de acidentes esperada para as condições do segmento rodoviário base para um ano específico. Os Fatores Modificadores de Acidentes (CMFs - *Crash Modification Factors*) são aplicados na equação 1 com o objetivo de ajustar o MPA para segmentos de pista simples determinado pela equação 2 às diferenças físicas entre a condição base do HSM e as condições locais de cada segmento. Existem ao todo 12 CMFs aplicáveis para os segmentos rodoviários de pista simples, sendo que mais detalhes podem ser obtidos na página 10-23 do HSM. O Fator de calibração (Cr), por sua vez, é necessário para contabilizar as diferenças entre a jurisdição e o período para o qual os modelos preditivos foram desenvolvidos e a jurisdição e o período em que são aplicados pelos usuários do HSM.

Tendo em vista que este trabalho visa estimar o  $N_{\text{previsto}}$  de acidentes em segmentos rodoviários, ou seja, acidentes que ocorreriam independentemente da presença de uma interseção, são apresentadas as considerações do HSM relativas a esse tipo de elemento. O manual define segmento rodoviário como segmento que inicia no centro de uma interseção e termina ou no centro da próxima interseção, ou quando houver uma mudança nas características do segmento homogêneo. Para segmentos de rodovias de pista simples, o HSM utiliza a Equação 2:

$$N_{\text{SPF}} = \text{VMDA} \times L \times 365 \times 10^{\alpha} \times e^{\beta} \quad (2)$$

Em que:  $N_{\text{SPF}}$ : frequência de acidentes esperada para as condições do segmento rodoviário base para um ano específico;  
VMDA: volume médio diário anual (veículos por dia);  
L: comprimento do segmento rodoviário (km); e  
 $\alpha$ ,  $\beta$ : parâmetros para ajuste do modelo.

Outro elemento importante relacionado com o método preditivo do HSM se refere à severidade dos acidentes e tipos de colisão. O método permite que o  $N_{\text{previsto}}$  seja estimado por severidade e por tipo. Para a determinação do  $N_{\text{previsto}}$  para um determinado tipo de acidente ou severidade, deve-se multiplicar o valor encontrado de  $N_{\text{SPF}}$  pela sua proporção dentro do total de acidentes, segundo tabelas contidas na página 10-17 do HSM. Essas tabelas também podem ser atualizadas para descrever os dados locais de acidentes de uma jurisdição, conforme no apêndice da parte C do mesmo.

### 3. MÉTODOS DE TRANSFERÊNCIA

Nesta seção são apresentados três métodos existentes na literatura para transferência de MPAs entre jurisdições, que serão avaliadas no presente trabalho. São eles: (i) o método do fator único de calibração, apresentado no HSM, (ii) o método de fatores múltiplos e (iii) o método de função de calibração.

#### 3.1. Fator de calibração único

O presente procedimento, proposto pelo HSM, busca ajustar para a aplicação do modelo preditivo, desenvolvido para dados de uma jurisdição, em outra jurisdição. A calibração leva em conta as diferenças entre jurisdições em fatores como clima, comportamento dos condutores, população de animais, limites do registro de acidentes e seus procedimentos. O fator de calibração Cr, utilizado na Equação 1, é calculado a partir da relação entre a soma da frequência de acidentes observados para um conjunto de locais analisados, dividido pela soma

da frequência média de acidentes previstos para os mesmos locais durante um mesmo período de tempo, conforme a Equação 3.

$$Cr = \frac{\sum_{\text{Todos os segmentos}} \text{Acidentes Observados}}{\sum_{\text{Todos os segmentos}} \text{Acidentes Previstos}} \quad (3)$$

Desse modo, espera-se que quando a soma das frequências média observadas e previstas forem iguais, o Cr será igual a 1,00. Quando o Cr divergir muito de 1,00, fica evidente a diferença entre o número de acidentes previstos e observados. Por meio da Tabela 1 é possível verificar alguns dos Cr já calculados para segmentos de rodovias rurais de pista simples no Brasil. O manual do HSM recomenda que esse fator seja verificado a cada dois ou três anos com dados recentes ou com os dados dos anos para o qual se deseja realizar alguma análise específica, como por exemplo, em um estudo antes e depois.

**Tabela 1:** Fatores de calibração para rodovias rurais de pista simples encontrados na literatura

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

Em relação aos dados necessários para a calibração, o HSM recomenda uma amostra mínima de 30 a 50 locais, que representem adequadamente as condições físicas e de segurança do elemento analisado. A amostra de locais não deve ser escolhida a partir do seu número de acidentes, ou seja, os locais analisados não devem ser intencionalmente escolhidos, limitando a amostra a locais com poucos ou muitos acidentes. Assim que os locais para a calibração forem definidos, o próximo passo é a reunião dos dados necessários, se já não estiverem disponíveis. Para o banco de dados, cada local deve possuir informações de acidentes observados para um ano ou mais e os dados das características da rede viária necessárias para aplicar o MPA, conforme o apêndice da parte C do HSM.

### 3.2. Múltiplos fatores de calibração

Jurisdições muito grandes ou com diferentes características entre locais, como por exemplo regiões com relevo muito diverso, podem ter diferentes fatores de calibração. Uma jurisdição que não é relativamente uniforme em relação ao terreno e clima pode escolher ter mais de um fator de calibração, sendo um para cada região. Na literatura revisada, Silva (2017) utilizou um fator de calibração para segmentos com curvas e outro para segmentos em tangente, enquanto Matarage e Dissanayake (2020) calibraram modelos separadamente para dois tipos de severidade e dois tipos de acidentes, resultando em quatro fatores de calibração.

Após resultados insatisfatórios da transferibilidade por meio de um único fator de calibração, Srinivasan *et al.* (2016) investigaram a divisão das variáveis do MPA em faixas de valores e a aplicação de diferentes Cr's para cada uma delas. Um fator de calibração diferente foi usado para três diferentes faixas de comprimento do segmento rodoviário e também três diferentes faixas de volume de tráfego para melhorar a transferência do modelo do HSM. Já Claros *et al.* (2018) relataram que a calibração por intervalos volume de tráfego superou todos os outros fatores de calibração e funções propostas.

### 3.3. Função de calibração

As funções de calibração podem ser usadas para incluir o efeito de muitas variáveis enquanto otimizam a sua forma funcional (Claros *et al.*, 2018). Srinivasan *et al.* (2016), diante de

resultados insatisfatórios envolvendo o uso de fatores de calibração, e visando aperfeiçoar a transferência do modelo do HSM para rodovias de pista simples do estado do Arizona, apresentaram a função de calibração descrita na Equação 4. Desta maneira, a partir de uma função paramétrica é possível ajustar o valor previsto pelo HSM aos dados de acidentes observados da jurisdição de interesse.

$$N_{\text{previsto}} = a \times (\text{HSM}_{\text{previsto}})^b \quad (4)$$

Onde:  $N_{\text{previsto}}$ : passa a ser o valor ajustado da Frequência de Acidentes Média Previsto para um segmento individual para um ano específico;

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

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

Nota-se que se o valor de  $b$  for igual a 1, o parâmetro  $a$  se transformará no fator de calibração simples. Porém esse modelo pode obter formas mais complexas, envolvendo mais do que dois parâmetros, não sendo estes aplicados ao resultado final da frequência de acidentes média prevista pelo HSM, mas aos diferentes componentes da equação 2. Ao comparar a transferência para diferentes estados norte-americanos, o estudo de Farid *et al.* (2018) encontrou que em todos os casos a função de calibração foi superior ao fator de calibração.

#### 4. MEDIDAS DE AJUSTE DO MODELO

Para avaliar a qualidade da transferência do modelo do HSM para uma jurisdição, é necessário identificar como ele se ajusta aos dados disponíveis. Existem diversas medidas de ajuste disponíveis representadas por um número único, mas todas elas descrevem apenas o ajuste geral do modelo, não sendo possível identificar em que regiões o modelo representa a realidade dos dados, e desse modo insuficiente para medir a qualidade do ajuste de um MPA (Hauer, 2015). Para uma análise mais robusta dos resultados é utilizada a plotagem CURE (CUMulative RESiduals- Resíduos acumulados). Os parâmetros utilizados para a função objetivo também podem ser utilizados como medidas de ajuste do modelo.

##### 4.1. CURE

O gráfico CURE mostra como é a qualidade do ajuste e quais são as regiões onde o modelo diverge dos dados disponíveis. Deseja-se que a soma acumulada dos resíduos de uma variável em modelo se alterne ao redor de 0, ficando contido dentro de um intervalo de dois desvios padrões. Grandes quedas verticais na plotagem CURE chamam a atenção e devem ser analisadas mais atentamente. O gráfico CURE é útil tanto para determinar se um ajuste é aceitável, quanto para julgar qual entre dois ajustes é o melhor. Essa abordagem permite analisar o desempenho de cada variável explicativa, podendo economizar tempo e recursos, além de melhorar a precisão das análises de segurança (Troyer *et al.*, 2015). Além da análise gráfica, pode-se utilizar a medida da porcentagem dos trechos que se encontram fora dos limites de dois desvios padrões (Matarage e Dissanayake, 2020).

##### 4.2. Função Objetivo

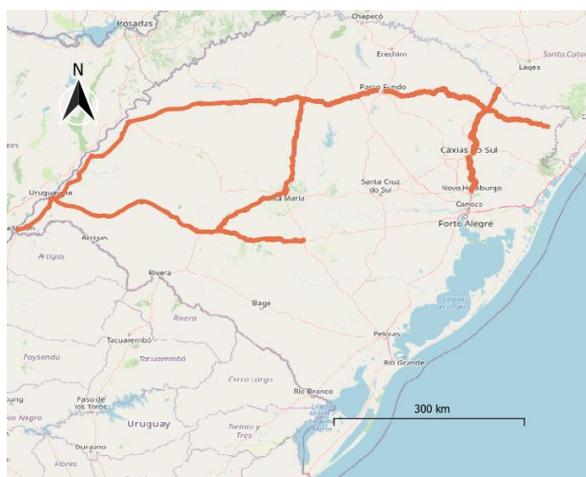
Neste estudo, para a determinação dos múltiplos fatores de calibração optou-se pela função objetivo de minimização dos quadrados ordinários. Já para a determinação dos parâmetros que compõe a função de calibração foi utilizada a máxima verossimilhança, por meio da regressão binomial negativa, de acordo com a equação 5. O resultado da soma do logaritmo da verossimilhança ( $LL_{NB}$ ) para cada segmento e o parâmetro  $\phi$  que indica a sobredispersão podem ainda ser utilizados para medir a qualidade de ajuste do modelo.

$$LL_{NB} = \sum_{i=0}^n [\ln \Gamma(k_i + \phi L_i) - \ln \Gamma(\phi L_i) + \phi L_i \ln(\phi L_i) + k_i \ln(\mu_i) - (\phi L_i + X) \times \ln(\phi L_i + \mu_i)] \quad (5)$$

Onde:  $k_i$ ,  $\mu_i$ : Número de acidentes observados e previstos para cada segmento, respectivamente;  
 $L_i$ : Comprimento do segmento em milhas; e  
 $\phi$ : Parâmetro de ajuste do modelo.

## 5. BASE DE DADOS

A base de dados utilizada nesse estudo é composta de 5 rodovias de pista simples no estado do Rio Grande do Sul, totalizando 1759,56 quilômetros. As rodovias analisadas abrangem grandes extensões tanto em relevo plano, quanto em relevo ondulado e montanhoso. Na Figura 1 é possível localizar essas rodovias dentro do mapa estadual, e na Tabela 2 são apresentadas as fontes das informações que compõem o banco de dados.



**Figura 1:** Mapa das rodovias analisadas (em destaque) no estado do Rio Grande do Sul

**Tabela 2:** Dados necessários para a construção da base de dados

<i>Dados necessários</i>	<i>Fonte</i>
Acidentes por tipo, severidade, local e data	(DPRF, 2020)
Volume de tráfego	(DNIT, 2020)
Informações geométricas e operacionais das rodovias	Programa BR-LEGAL e Autores

### 5.1. Dados de acidentes

A base de dados de acidentes foi extraída dos dados abertos da Polícia Rodoviária Federal (PRF), disponibilizados anualmente desde 2007 (DPRF, 2020). Todo acidente registrado apresenta informações sobre: dia, hora, rodovia, cidade, quilômetro, coordenadas, causa do acidente, tipo de pista, traçado da via, número de mortos, número de feridos (leves, graves e total de feridos) e o número de veículos envolvidos no acidente.

O HSM recomenda o uso de 3 ou mais anos de acidentes. Este trabalho limitou-se ao uso dos dados de acidentes entre os anos de 2017 a 2019, visto que os mesmos possuem informações georreferenciadas, utilizadas desde 2017, o que permite uma localização mais precisa. Os acidentes que aconteceram em rotatórias, interseções, retornos regulamentados e desvios temporários foram excluídos do banco de dados por não estarem relacionados com o objetivo do trabalho, que trata apenas de trechos de segmentos rodoviários padrão.

Ao analisar os dados de acidentes da PRF, os autores identificaram a característica de subnotificação dos dados de acidentes com apenas danos materiais. Isso se deve ao fato de que desde 2016 adotou-se o registro DAT (Declaração de Acidente de Trânsito). Este é um

registro preenchido pela internet para acidentes que se encaixam em certas categorias, entre esses, acidentes que não registram nenhum tipo de vítima, nem mesmo levemente. Essa característica se mostra clara na Tabela 3, que compara a proporção de acidentes por severidade adotado pelo modelo do HSM e a proporção observada em 9199 acidentes em segmentos de pista simples em todo o estado do Rio Grande do Sul para os anos do estudo.

**Tabela 3:** Comparação da proporção da Severidade dos acidentes em segmentos de pista simples de acordo com o HSM e com o banco de dados da PRF

<i>HSM</i>		<i>Dados PRF</i>	
Fatal (K)	1,3%	Mortes	6.7%
Lesão incapacitante (A)	5,4%	Feridos graves	50.8%
Lesão não incapacitante (B)	10,9%	Feridos leves	10.9%
Possível lesão (C)	14,5%		
Total com feridos (ABC)	30.8%	Feridos Total	61.7%
Total de faltal mais feridos (KABC)	32,1%	Mortos mais Feridos	68.3%
Somente danos materiais (PDO)	67,9%	Acidentes sem vítimas	31.7%
Total (KABCO)	100,0%	Acidentes Totais	100.0%

## 5.2. Dados de geometria

O estudo utilizou diversas informações oriundas do programa BR-LEGAL (DNIT,2015), que buscou renovar a sinalização das rodovias federais em todos os estados, resultando em um banco de dados extenso. Por meio desse programa foram obtidos diversos dados requeridos pelo HSM, como informações sobre a pista, acostamentos, greide e acessos. Posteriormente outros dados foram obtidos por análise de imagens por satélite, como o design lateral da rodovia (*RHR*, sigla em inglês), a presença de faixas de ultrapassagem e a confirmação da quantidade de acessos.

As informações referentes às curvas horizontais foram levantadas por meio dos *softwares* SAEPRO e a ferramenta ROCA (Bíl *et al.*, 2018), disponível para ArcGIS. Essas variáveis, em conjunto com as apresentadas anteriormente, foram utilizadas para dividir a rede viária em segmentos homogêneos, conforme o HSM (AASHTO, 2010), resultando em 2569 segmentos. Além disso, as seguintes suposições foram adotadas como padrão: presença de curva de transição, ausência de iluminação, ausência de guia sonora no centro da pista, nenhuma diferença da superelevação real para a de projeto, ausência de faixa central para conversão à esquerda e nenhuma fiscalização eletrônica de velocidade.

## 5.3. Dados de tráfego

Os dados de tráfego foram extraídos do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT, 2020) que identificou 320 locais no país para receber a instalação dos postos de coletas permanentes. Para análise dos dados de acidentes de 2017 a 2018, foi utilizada a média das estimativas do VMDA (Veículos Médio Diário Anual), uma vez que os dados 2019 ainda estavam disponíveis até a realização deste estudo. O resumo do banco de dados pode ser visto na Tabela 4.

**Tabela 4:** Estatística descritiva de variáveis relacionadas à rede viária

<i>Variável</i>	<i>Frequência</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Comprimento (m)	-	685	1095,1	160	10000
VMDA (veic/dia)	-	3893	2153,4	671	13343
Largura da faixa (m)	-	3,45	0,489	2,40	8,00
Largura do acostamento (m)	-	2,29	0,489	0,00	4,00
Raio (curva horizontal) (m)	1218	350	245,1	45	1200

**Tabela 4:** Estatística descritiva de variáveis relacionadas à rede viária

<i>Variável</i>	<i>Frequência</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Acidentes Totais	2322	0,90	1,82	0	35
Mortos	113	0,04	0,22	0	3
Feridos	1445	0,56	1,34	0	29
Danos Materiais	764	0,30	0,71	0	8

## 6. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados da aplicação dos 3 métodos selecionados a partir dos dados consolidados, para o conjunto de rodovias de pista simples do estado do Rio Grande do Sul.

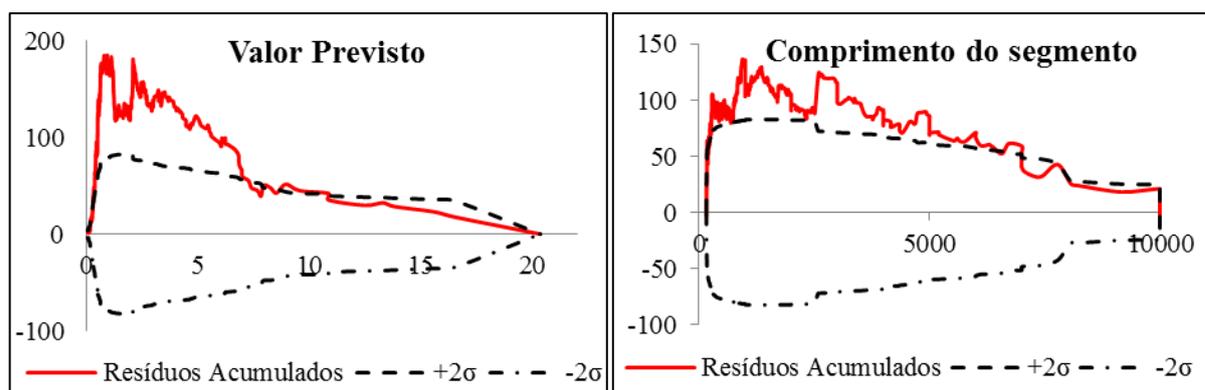
### 6.1 Aplicação do fator de calibração único

Aplicando os dados coletados das rodovias rurais de pista simples nas Equações 1 e 2, obtém-se o número de acidentes previstos para cada segmento. A partir da soma de todos os acidentes observados, divididos pela soma de todos os acidentes previstos, conforme a Equação 3, encontra-se o fator de calibração único. Separando os acidentes por severidade, de acordo com as proporções padrão do HSM, como na Tabela 3, é possível estimar um fator de calibração único para cada severidade, conforme a Tabela 5.

**Tabela 5:** Fator de calibração para cada tipo de severidade, de acordo com o MPA do HSM

<i>Acidentes por Severidade</i>	<i>Observados</i>	<i>Previstos</i>	<i>Fator de Calibração</i>
Total de acidentes	2322	3486	0.666
Feridos e mortos	1558	1119	1.393
Danos materiais	764	2367	0.323

Ao analisar a plotagem dos resíduos acumulados, de acordo com a Figura 2, percebe-se que os valores não se alteraram em torno de 0, para as duas variáveis analisadas, mas permaneceram acima do limite de dois desvios padrões por mais de 70% dos segmentos. O fato de a curva (em vermelho) estar consistentemente em alta indica que o modelo prevê menos acidentes que os observados para a maior parte dos comprimentos de segmento e valores previstos. Sendo assim, o modelo do HSM calibrado por um único fator não apresentou um bom ajuste aos dados, não representando a realidade para a maioria dos intervalos analisados de valor previsto e comprimento do segmento.



**Figura 2:** Plotagem CURE do valor previsto e comprimento do segmento para o MPA do HSM calibrado pelo fator de calibração único

### 6.2 Aplicação de múltiplos fatores de calibração

No caso da aplicação de múltiplos fatores de calibração, três abordagens foram testadas: (i) divisão em faixas de comprimento dos segmentos; (ii) divisão em faixas de quantidade de

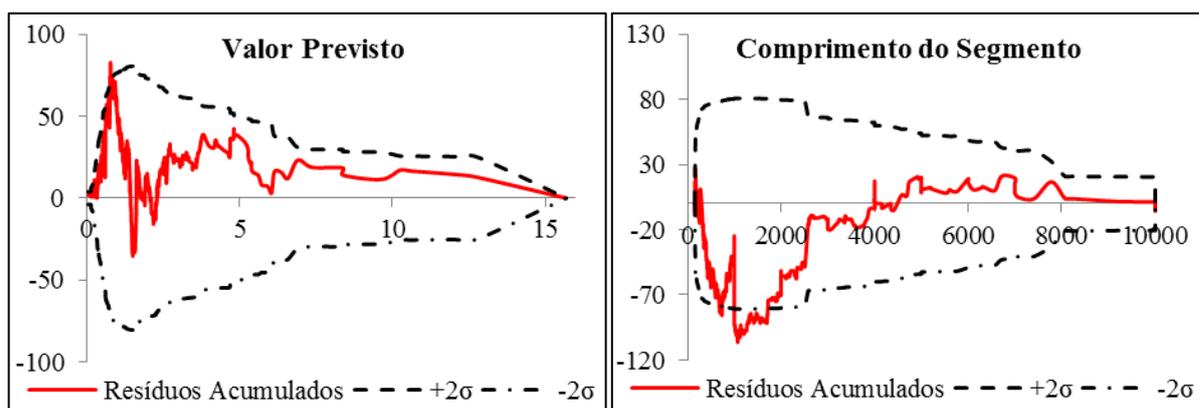
tráfego e (iii) divisão entre segmentos rodoviários localizados na parte Oeste e Leste do estado. Diversas faixas de valores foram testadas, e a partir de mínimos quadrados chegou-se aos fatores de calibração para o total de acidentes, contidos na Tabela 6.

**Tabela 6:** Diferentes fatores de calibração utilizados para calibração do MPA do HSM

Variável	Faixa de análise	Fator de Calibração
Comprimento do Segmento (m)	$L < 500$ m	0.781
	$500 \leq L < 1250$ m	0.758
	$L \geq 1250$ m	0.514
Quantidade de Tráfego (veic/dia)	$VMDA < 2500$	0.781
	$2500 \leq VMDA < 5000$	0.758
	$VMDA \geq 5000$	0.514
Região do Estado	Leste	0.782
	Oeste	0.597
Todos os segmentos	Geral	0.666

Observa-se que os fatores de calibração variam de forma significativa entre as faixas em análise, mostrando que um único fator de calibração pode não ser o mais adequado para transferir o modelo do HSM para outra jurisdição. O fator de calibração tende a ser maior para segmentos menores que 500 m, onde o volume de tráfego é menor que 2500 veículos por dia, ou na região Leste do estado do Rio Grande do Sul. Isso mostra que nesses casos o número de acidentes previstos foi maior do que o estimado para todos os segmentos.

Analisando os gráficos CURE das três abordagens analisadas, constatou-se que somente no primeiro caso, separação em três faixas de comprimento de segmento, houve uma melhora significativa na transferibilidade do modelo do HSM, tendo apenas 2% dos segmentos fora do intervalo de dois desvios padrão para os valores previstos. A separação por faixas de quantidade de tráfego e por zona do estado apresentaram esse mesmo indicador como 66% e 72%, respectivamente. Com base nestes resultados, apresenta-se aqui somente a plotagem dos gráficos para o primeiro caso, na Figura 3.



**Figura 3:** Plotagem CURE do valor previsto e comprimento do segmento para o MPA do HSM calibrado por três diferentes fatores de calibração para o comprimento do segmento

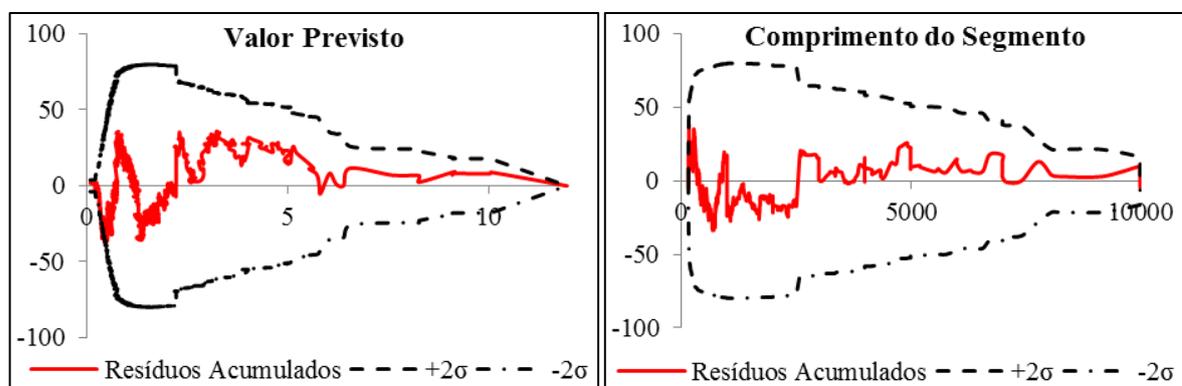
### 6.3 Aplicação da função de calibração

O terceiro método testado para a transferência do modelo foi a utilização de uma de função de calibração. Três diferentes funções foram otimizadas pela máxima verossimilhança, chegando-se aos parâmetros indicados na Tabela 7. Percebe-se que quanto maior o número de parâmetros utilizados, maior o valor de  $\phi$  e de  $LLnb$ , demonstrando uma melhora na modelagem, apesar de esta ser tímida.

**Tabela 7:** Funções de calibração utilizados para aperfeiçoar a calibração do MPA do HSM

	<i>Função de Calibração</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$\phi$	<i>LLnb</i>
1	$a \times (L \times VDMA \times AMF \times cte)^b$	0.750	0.833	-	-	2.922	-1474.1
2	$a \times (L^b \times VDMA^c \times AMF \times cte)$	9.434	0.873	0.669	-	2.934	-1470.7
3	$a \times (L^b \times VDMA^c \times AMF^d \times cte)$	1020.243	0.841	0.642	0.762	2.940	-1468.2

Os gráficos CURE das três funções apresentam baixas porcentagens de segmentos fora do intervalo de dois desvios padrão para o valor previsto, sendo 0% para a função 1, 1,1% para a função 2 e 4,5% para a função 3. A plotagem CURE da função de calibração 3, apresentada na Figura 4, mostra que os valores dos resíduos oscilam mais regularmente em torno do zero do que nos outros métodos, o que é desejável.



**Figura 4:** Plotagem CURE do valor previsto e comprimento do segmento para o MPA do HSM calibrado pela função de calibração 3

## 7. DISCUSSÃO

Observa-se que a aplicação direta do modelo do HSM previu menos acidentes do que os observados, contrariando os resultados dos trabalhos revisados realizados no Brasil, o que causa estranheza. Isso pode ser explicado pelas características de subnotificação de acidentes sem feridos do atual banco de dados da PRF. O fator de calibração obtido considerando todos acidentes foi igual a 0,666, enquanto ao analisarmos os fatores para cada tipo de severidade previsto pelo HSM, temos um fator de 1,393 para acidentes com feridos e mortos e um fator de 0,323 para acidentes com apenas danos materiais. Um fator de calibração de 0,323 é baixo e deve ser analisado com cuidado, pois contraria os resultados de trabalhos anteriores de calibração do HSM no país (ver Tabela 1). Isso demonstra a necessidade de cautela no uso do banco de dados da PRF para a estudos que avaliem acidentes com baixa severidade.

Para a análise da transferibilidade dos modelos, os gráficos CURE mostram um desempenho insatisfatório do fator de calibração único, fato que se repete para todos os tipos de severidades analisadas. Ao se utilizar fatores múltiplos observou-se através dos gráficos CURE que a única abordagem que efetivamente melhorou as medidas de ajuste foi a divisão do comprimento do segmento em 3 diferentes faixas. Segmentos com menores comprimentos apresentaram um fator de acidentes maior, o que confirma o encontrado por Srinivasan *et al.* (2016). Isso pode ser explicado pelo fato de que durante o processo de segmentação homogênea os segmentos menores são aqueles encontrados em tangentes ou curvas em terrenos mais tortuosos, enquanto os mais extensos se encontram em zonas planas e com longas retas.

A aplicação de funções de calibração apresentou um resultado positivo na transferibilidade do MPA do HSM, para as todas funções testadas, com 2, 3 e 4 parâmetros. Esse método pode ser considerado mais adequado do que o anterior, uma vez que este apresenta resultados melhores para a os gráficos CURE e pode ser considerado mais simples. Esse resultado é positivo, uma vez que o processo de transferência de um MPA é dispendioso, sendo necessários um extenso banco de dados e muitas horas de trabalho conforme destacado por Srinivasan *et al.* (2013). Métodos simples como a utilização de múltiplos fatores de calibração e especialmente a função de calibração podem ajudar a trazer resultados satisfatórios à transferibilidade do modelo do HSM para qualquer jurisdição.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os MPAs são modelos estatísticos de regressão que permitem prever o número de acidentes por tipo e severidade a partir das características de um elemento rodoviário (ex: rodovias de pista simples). Visando ter um modelo que represente adequadamente a condição das rodovias brasileiras, este trabalho testou três diferentes métodos para transferir o MPA do HSM para segmentos de rodovias de pista simples do estado do Rio Grande do Sul.

Os resultados da calibração do HSM mostraram que o modelo desenvolvido para as rodovias dos Estados Unidos previu mais acidentes do que aqueles observados nas rodovias analisadas neste estudo. Este resultado contraria estudos anteriores que mostram um número de acidentes observados pelo menos duas vezes maior que o previsto pelo modelo do HSM. Isso se deve ao fato de que este trabalho se baseia em dados recentes da Polícia Rodoviária Federal, que têm a característica de subnotificação dos acidentes sem vítimas. Esse banco de dados cobre todas as rodovias federais pavimentadas do país e pode ser muito útil para a utilização de MPAs transferidos ou desenvolvidos localmente. Contudo, a ênfase deve ser dada a modelos que estimem o número de acidentes fatais e com feridos leves ou graves. Além da limitação da qualidade dos dados da PRF, pode-se citar também às suposições feitas no Seção 5.2 e às ferramentas utilizadas para obtenção de informações da geometria da via.

A análise dos resíduos acumulados (CURE) mostrou que a adoção de um único fator de calibração não apresentou um resultado satisfatório. Os métodos de múltiplos fatores de calibração e de funções de calibração levaram a uma melhor transferibilidade do modelo do HSM. Isso demonstra que a partir de métodos simples, principalmente a função de calibração, é possível obter uma melhor qualidade de ajuste para o MPA do HSM aos dados, permitindo uma melhor transferibilidade para as rodovias brasileiras.

## REFERÊNCIAS

- AASTHO. (2010) *Highway safety manual*. (1st ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Bíl, M., Andrášik, R., Sedoník, J., e Cícha, V. (2018) ROCA – An ArcGIS toolbox for road alignment identification and horizontal curve radii computation. *PLoS ONE*, 13(12). doi:10.1371/journal.pone.0208407
- Claros, B., Sun, C., e Edara, P. (2018) HSM calibration factor, calibration function, or jurisdiction-specific safety model – A comparative analysis. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1–20. doi:10.1080/19439962.2018.1477896
- CNT (2019). Relatório Gerencial – *Pesquisa Rodoviária 2019*. Confederação Nacional do Transporte (CNT).
- Cunto, F., Sobreira, L., e Ferreira, S. (2015) Assessing the Transferability of the Highway Safety Manual Predictive Method for Urban Roads in Fortaleza City, Brazil. *Journal of Transportation Engineering*, 141(1), 04014072. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000734
- DPRF (2020) Acidentes. Departamento De Polícia Rodoviária Federal. Obtido 1 de fevereiro de 2020, de <https://portal.prf.gov.br/dados-abertos-acidentes>

- DNIT (2015) Guia Prático: Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária – BR-LEGAL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Obtido 10 de fevereiro de 2020, de <http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/programa-br-legal>
- DNIT. (2020) *Plano Nacional de Contagem de Tráfego*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Obtido 10 de fevereiro de 2020, de <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/Modelagem>
- Elvik, R. (2010) *Assessment and applicability of road safety management evaluation tools: Current practice and state-of-the-art in Europe*. Report 1113/2010. Institute of Transport Economics, Oslo, Norway
- Farid, A., Abdel-Aty, M., e Lee, J. (2018) A new approach for calibrating safety performance functions. *Accident Analysis & Prevention*, 119, 188–194. doi:[10.1016/j.aap.2018.07.023](https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.023)
- Hauer, E. (2015) *The art of regression modeling in road safety*. Springer, New York.
- Kaaf, K. A., e Abdel-Aty, M. (2015) Transferability and Calibration of Highway Safety Manual Performance Functions and Development of New Models for Urban Four-Lane Divided Roads in Riyadh, Saudi Arabia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2515(1), 70–77. doi:[10.3141/2515-10](https://doi.org/10.3141/2515-10)
- Lima, T. F. de, Silva, A. M. O., de Vasconcelos T. B., Macena R. H. M. Análise epidemiológica dos acidentes de trânsito no Brasil. *Encontro de Extensão, Docência e Iniciação Científica (EEDIC)*, [S.l.], v. 5, n. 1, mar. 2019.
- Matarage, I. C., e Dissanayake, S. (2019) Calibration of highway safety manual predictive models for Kansas freeway segments. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 26(3), 251–259. doi:[10.1080/17457300.2019.1621351](https://doi.org/10.1080/17457300.2019.1621351)
- Matarage, I. C., e Dissanayake, S. (2020) Quality assessment between calibrated highway safety manual safety performance functions and calibration functions for predicting crashes on freeway facilities. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(1), 76–87. doi:[10.1016/j.jtte.2019.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.12.001)
- Moraldi, F., La Torre, F., e Ruhl, S. (2019) Transfer of the *Highway Safety Manual* predictive method to German rural two-lane, two-way roads. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1–20. doi:[10.1080/19439962.2019.1571546](https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1571546)
- Russo, F., Busiello, M., Biancardo, S. A., e Dell’Acqua, G. (2014) Assessing Transferability of Highway Safety Manual Crash Prediction Models to Data from Italy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2433(1), 129–135. doi:[10.3141/2433-15](https://doi.org/10.3141/2433-15)
- Qin, X., Rahman Shaon, M. R., e Chen, Z. (2016) Developing Analytical Procedures for Calibrating the *Highway Safety Manual* Predictive Methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2583(1), 91–98. doi:[10.3141/2583-12](https://doi.org/10.3141/2583-12)
- Sacchi, E., Persaud, B., e Bassani, M. (2012) Assessing International Transferability of Highway Safety Manual Crash Prediction Algorithm and Its Components. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2279(1), 90–98. doi:[10.3141/2279-11](https://doi.org/10.3141/2279-11)
- Srinivasan, R., D. Carter, and K. Bauer. (2013) *Safety Performance Function Decision Guide: SPF Calibration vs. SPF Development*. FHWA-SA-14-004. FHWA, U.S. Department of Transportation, Sept. 2013.
- Srinivasan, R., Colety, M., Bahar, G., Crowther, B., e Farmen, M. (2016) Estimation of Calibration Functions for Predicting Crashes on Rural Two-Lane Roads in Arizona. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2583(1), 17–24. doi:[10.3141/2583-03](https://doi.org/10.3141/2583-03)
- Silva, K. C R. (2012), *Aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do estado de São Paulo*. Universidade de São Paulo.
- Silva, K. C R. (2017), *Avaliação da Transferibilidade de modelos de previsão de acidentes em rodovias de pista simples do Brasil*. Universidade de São Paulo.
- Thomazi K. R. (2018). *Elaboração de modelos de previsão de acidentes de trânsito em rodovias rurais de pista simples do estado de Santa Catarina com base no Highway Safety Manual*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Waihrich, D. R. L. da S. (2016). *Calibração do método de previsão de acidentes do Highway Safety Manual (HSM) para trechos rodoviários de pista dupla do Brasil*. 2016. Universidade de Brasília.

---

Andrey Zurriel Ebeling Bonatto (andrey.bonatto@gmail.com)

Cesar Luis Andriola (andriola.cesar@gmail.com)

Christine Tessele Nodari (piti@producao.ufrgs.br)

Daniel Sergio Presta Garcia (daniel.garcia@ufrgs.br)

Laboratório de Sistemas de Transportes – Departamento de Engenharia de Produção e Transportes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Av. Osvaldo Aranha, 99 – Porto Alegre, RS, Brasil