

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGISTICA

ANA CAROLINA UHLEMANN MEYER

AVALIAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS E APLICAÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS DE
ACIDENTES: ESTUDO DE CASO NA SERRA DO MAR

Joinville
2025

ANA CAROLINA UHLEMANN MEYER

AVALIAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS E APLICAÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS DE
ACIDENTES: ESTUDO DE CASO NA SERRA DO MAR

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Helry
Luvillany Fontenele Dias

Joinville
2025

ANA CAROLINA UHLEMANN MEYER

AVALIAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS E APLICAÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS DE
ACIDENTES: ESTUDO DE CASO NA SERRA DO MAR

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 28 de Novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias
Orientador
Presidente

Prof. Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Felipe Soares Tiburcio
Membro(a)
Prefeitura Municipal de Joinville

Dedico este trabalho ao meu avô, Nelson Uhlemann (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, que sempre esteve ao meu lado. Obrigada pelos conselhos, pelas palavras de encorajamento e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei das minhas próprias capacidades.

Ao meu orientador, registro minha sincera gratidão pela orientação atenciosa, pela paciência e pelas contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à Universidade Federal de Santa Catarina e a todo o corpo docente do curso de Engenharia de Transportes e Logística, que contribuíram de maneira decisiva para minha formação acadêmica e pessoal.

À Concessionária Arteris, deixo meu agradecimento pela disponibilização dos dados utilizados nesta pesquisa, permitindo a condução das análises e simulações que fundamentam este estudo.

Meu agradecimento especial vai às minhas amigas de curso, Julia Kerolin e Ana Corrêa, pela parceria, pelas conversas que tornaram os dias mais leves e pelo apoio constante ao longo dessa trajetória. Aos amigos que ingressaram comigo na universidade e cresceram ao meu lado, sou igualmente grata pelas lembranças que construímos e por cada gesto de incentivo durante esses anos.

Agradeço também aos amigos que acompanharam essa jornada mesmo de longe, sempre torcendo por mim, assim como aqueles que fiz ao longo da graduação, com quem compartilhei risos, desafios, madrugadas de estudo e momentos de superação.

Por fim, agradeço ao meu namorado pelo apoio, compreensão, apoio emocional e paciência ao longo desta jornada. Sua presença e incentivo constante foram fundamentais para que eu seguisse com tranquilidade e determinação em cada etapa do caminho.

"A jornada é o que nos traz a felicidade, não o destino." Dan Millman .

RESUMO

A Serra do Mar é uma região caracterizada por estradas sinuosas e declividades acentuadas que conectam diversas cidades, configurando um cenário propício à ocorrência de acidentes de trânsito. Esses eventos são frequentemente associados a uma combinação de fatores, como curvas fechadas, rampas íngremes, elevada presença de veículos pesados e em alguns períodos, condições climáticas adversas, como neblina e chuva. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo identificar os pontos críticos de acidentalidade e aplicar modelos preditivos capazes de estimar a ocorrência de acidentes no trecho da BR-376, compreendido entre os quilômetros 662 e 671, selecionado por apresentar histórico relevante de acidentalidade, além de características geométricas e operacionais que contribuem para o aumento do risco. A metodologia adotada envolveu a identificação dos pontos críticos por meio da Taxa de Severidade, bem como a aplicação do modelo preditivo do Highway Safety Manual (HSM) e do método Empírico-Bayes (EB) para estimar a frequência esperada de acidentes. Os resultados indicaram quatro trechos críticos, todos associados a curvas horizontais acentuadas e declividades elevadas. A aplicação inicial do HSM subestimou de forma expressiva a acidentalidade local, prevendo 160 acidentes, aproximadamente 39% abaixo do total observado. A calibração do modelo reduziu esse desvio mediante a aplicação de fatores de ajuste (C_r) que oscilaram entre 1,89 e 8,92, evidenciando uma variação considerável necessária para alinhar as estimativas aos valores reais. A aplicação do método Empírico-Bayes aprimorou significativamente a qualidade das estimativas, produzindo um total esperado de 221 acidentes, valor mais consistente com a variabilidade e as características operacionais do trecho. Esses resultados demonstram que a acidentalidade na Serra do Mar é fortemente influenciada por condições geométricas e operacionais específicas da região e evidenciam que a combinação entre a calibração local e o método Empírico-Bayes torna o modelo preditivo mais robusto para apoiar decisões de segurança viária e orientar intervenções no trecho.

Palavras-chave: Segurança viária. Acidentes. Modelos Preditivos. Serra do Mar. Pontos Críticos.

ABSTRACT

The Serra do Mar is a region characterized by winding roads and steep slopes that connect several cities, creating a scenario conducive to traffic accidents. These events are frequently associated with a combination of factors, such as sharp curves, steep ramps, a high presence of heavy vehicles, and, at certain times, adverse weather conditions such as fog and rain. In this context, this study aims to identify critical accident points and apply predictive models capable of estimating the occurrence of accidents on the BR-376 highway section between kilometers 662 and 671, selected for its significant accident history, as well as geometric and operational characteristics that contribute to increased risk. The methodology adopted involved identifying critical points using the Severity Rate, as well as applying the Highway Safety Manual (HSM) predictive model and the Empirical-Bayes (EB) method to estimate the expected frequency of accidents. The results indicated four critical sections, all associated with sharp horizontal curves and steep slopes. The initial application of the HSM significantly underestimated local accident rates, predicting 160 accidents, approximately 39% below the observed total. Model calibration reduced this deviation by applying adjustment factors (C_r) ranging from 1.89 to 8.92, highlighting a considerable variation necessary to align the estimates with the actual values. The application of the Empirical-Bayes method significantly improved the quality of the estimates, producing an expected total of 221 accidents, a value more consistent with the variability and operational characteristics of the stretch. These results demonstrate that accident rates in the Serra do Mar are strongly influenced by specific geometric and operational conditions of the region and show that the combination of local calibration and the Empirical-Bayes method makes the predictive model more robust to support road safety decisions and guide interventions in the stretch.

Keywords: Road safety. Accidents. Predictive Models. Serra do Mar. Critical Points

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do Trabalho	14
Figura 2 – Fluxograma Metodologia	26
Figura 3 – Fluxograma Etapas do Modelo Preditivo	29
Figura 4 – Tipos de Acidentes	43
Figura 5 – Perfil da Pista	44
Figura 6 – Traçado da Pista	45
Figura 7 – Condição da Pista	46
Figura 8 – Condição de Tempo	47
Figura 9 – Extensão analisada	48
Figura 10 – KM665	50
Figura 11 – KM668	51
Figura 12 – KM669	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – AMF_{RA} para tipos de colisão relacionados à largura da faixa	33
Tabela 2 – AMF_{2rd} para largura do acostamento para segmentos de rodovia divididos	34
Tabela 3 – AMF_{3rd} para Largura do canteiro central em segmentos de rodovia divididos	34
Tabela 4 – Proporção de acidentes noturnos em trechos de rodovia sem iluminação	35
Tabela 5 – Características para calibração do modelo de previsão de acidentes para rodovias rurais de pista dupla	37
Tabela 6 – Pontos Críticos	48
Tabela 7 – Divisão em trechos homogêneos da BR-376	53
Tabela 8 – Resultado dos modelos preditivos	53
Tabela 9 – Qualidade de ajuste	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA	12
1.2	OBJETIVO	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.2.3	Justificativa	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	SEGURANÇA VIÁRIA	16
2.1.1	Acidentes de Trânsito	17
2.2	PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS	19
2.2.1	Rodovias em Regiões Montanhosas	20
2.3	MODELOS PREDITIVOS DE ACIDENTES	22
2.3.1	Highway Safety Manual	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS	26
3.2	MODELAGEM PREDITIVA	27
3.2.1	Fatores de Modificação de Acidentes	32
3.2.2	Fator de Calibração	36
3.2.2.1	Medidas de Qualidade de Ajustes	38
3.2.3	Método Empírico de Bayes	40
4	ESTUDO DE CASO	41
4.1	ANÁLISE DOS DADOS	42
4.2	IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS	47
4.3	APLICAÇÃO DO MODELO PREDITIVO	52
5	ANALISE DOS RESULTADOS	57
5.1	PROPOSTAS DE MEDIDAS E MELHORIAS	57
5.2	ANALISE DOS METODOS	58
6	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A segurança viária constitui um tema de relevância global e tem sido amplamente discutida por governos, organizações internacionais e centros de pesquisa. Os acidentes de trânsito se estabelecem como uma das principais causas de mortalidade, ultrapassando, em alguns países, os índices de óbitos por doenças endêmicas. De acordo com o Global Status Report on Road Safety da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021), aproximadamente 1,19 milhão de indivíduos perdem a vida anualmente em decorrência de sinistros viários, representando mais de 3.700 mortes diárias.

Além disso, estima-se que entre 20 e 50 milhões de indivíduos sobrevivam com lesões, muitas delas permanentes. Esse cenário evidencia que a segurança no trânsito deve ser tratada não apenas como uma questão de engenharia de transportes, mas, sobretudo, como um problema de saúde pública e de desenvolvimento social.

A distribuição geográfica dos acidentes de trânsito, no entanto, revela desigualdades significativas. Embora países de baixa e média renda possuam cerca de 60% da frota mundial de veículos, eles registram mais de 90% das mortes no trânsito. Isso revela não apenas falhas estruturais nos sistemas de transporte, mas também limitações em termos de fiscalização, campanhas de conscientização e investimentos em infraestrutura viária (OMS, 2021).

Regiões como a União Europeia apresentam reduções consistentes nas fatalidades desde 2000, em grande parte devido a políticas públicas integradas, melhorias na infraestrutura e programas educativos (Comissão Europeia, 2025). Da mesma forma, a Suécia destaca-se como referência mundial com o programa Vision Zero, que tem como objetivo eliminar mortes no trânsito. Em contrapartida, países latino-americanos, incluindo o Brasil, mesmo como signatários da Década de Ação pela Segurança no Trânsito (ONU, 2021), ainda enfrentam dificuldades para implementar estratégias estruturais eficazes.

No contexto nacional, os acidentes de trânsito representam um dos principais desafios para a segurança viária no Brasil. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada 2020, esses eventos geram custos anuais estimados em R\$ 50 bilhões, valor correspondente a aproximadamente 1% do Produto Interno Bruto (PIB). Tais custos englobam despesas médico-hospitalares, previdenciárias, danos materiais, congestionamentos e perdas de produtividade. Além disso, estima-se que cerca de 60% das internações por causas externas no Sistema Único de Saúde (SUS) estejam relacionadas a acidentes de trânsito, o que evidencia seu impacto na sobrecarga dos serviços públicos de saúde (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2023).

A gravidade do problema fica ainda mais evidente ao analisar os números da Polícia Rodoviária Federal 2023. Apenas no ano de 2022, foram registrados 64.421 acidentes em rodovias federais, resultando em 72.900 feridos e 5.426 mortes. Esses números reforçam que, apesar de avanços pontuais, a situação permanece crítica. Os impactos transcendem as vítimas diretas, atingindo famílias, comunidades e o desempenho econômico nacional.

Esse cenário torna-se ainda mais desafiador quando associamos a segurança viária ao transporte de cargas, especialmente considerando que aproximadamente 60% da carga transportada no país utiliza o modal rodoviário (Confederação Nacional do Transporte, 2022). Acidentes que geram bloqueios, interrupções ou derramamento de materiais perigosos impactam diretamente as cadeias produtivas e o meio ambiente, ampliando as consequências negativas para a sociedade.

Os fatores que contribuem para a ocorrência de acidentes são múltiplos e interdependentes. Aspectos comportamentais, abrangem condutas como excesso de velocidade, desrespeito às normas de circulação, uso de álcool e fadiga, responsáveis por mais de 50% das ocorrências registradas (SHINAR, 2017).

Já os fatores infraestruturais relacionam-se às condições da via, incluindo pavimento, sinalização, iluminação e geometria, sendo que curvas fechadas e declividades acentuadas aumentam significativamente o risco de acidentes (ELVIK, 2009). Por fim, os fatores ambientais envolvem condições climáticas adversas, como chuvas intensas, neblina e baixa visibilidade, que reduzem o tempo de reação dos condutores e ampliam as chances de colisões.

As rodovias situadas em regiões montanhosas apresentam riscos ainda mais significativos devido às características geométricas complexas e às condições climáticas adversas. A Serra do Mar, localizada na região que abrange os estados de Santa Catarina e Paraná, representa um dos principais corredores logísticos da Região Sul, conectando o planalto ao litoral e desempenhando papel central no acesso ao porto de Itajaí (Autoridade Portuária de Itajaí, 2019). No entanto, o trecho apresenta relevo íngreme, curvas acentuadas, elevada declividade e ocorrência frequente de neblina e chuvas. Relatórios da concessionária Arteris S.A. (2023) indicam altos índices de colisões traseiras, tombamentos e saídas de pista, especialmente em segmentos críticos.

Essa realidade torna-se essencial a realização de estudos aprofundados sobre o tema, utilizando metodologias capazes de identificar padrões, prever ocorrências e orientar medidas mitigadoras. Um dos principais desafios é integrar dados históricos de acidentes com variáveis operacionais e ambientais, de forma a construir modelos que permitam compreender não apenas onde, mas também por que os acidentes ocorrem.

A escolha da Serra do Mar como objeto de estudo é motivada por uma combinação de fatores que evidenciam sua importância estratégica. Trata-se de uma

região de relevância econômica, por concentrar fluxos intensos de transporte de cargas e passageiros entre o litoral e o interior. Além disso, apresenta incidências de acidentes em trechos de relevo montanhoso no país, decorrentes de suas características geométricas. A disponibilidade de dados confiáveis para parte desse trecho também reforça seu potencial para análises, permitindo a elaboração de propostas de intervenção eficazes.

Nesse contexto, a seleção específica dos quilômetros 662 a 671 fundamenta-se nas informações fornecidas pela concessionária Arteris. Entre todos os documentos disponibilizados, esse segmento foi o que apresentou registros completos e estruturados sobre a ocorrência de acidentes, possibilitando a aplicação de abordagens estatísticas.

Segundo SILVA; ANDRADE; FERREIRA (2020), o uso de modelos baseados em aprendizado de máquina e técnicas estatísticas avançadas tem se mostrado eficiente na identificação de fatores determinantes e na previsão da probabilidade de acidentes. Assim, este estudo insere-se em uma abordagem proativa de segurança viária, que busca antecipar riscos e orientar intervenções preventivas. Dessa forma, o presente trabalho combina engenharia de transportes e análise estatística, contribuindo diretamente para o aprimoramento da segurança viária na Serra do Mar e no país.

1.1 PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA

Diante da elevada incidência de sinistros na Serra do Mar e da complexidade dos fatores que influenciam sua ocorrência, tais como condições geométricas, características operacionais, clima adverso e volume acentuado de veículos pesados, torna-se essencial identificar os trechos que apresentam maior vulnerabilidade.

Embora a literatura aponte diferentes abordagens para análise de pontos críticos e previsão de acidentes (ELVIK, 2009), a aplicação dessas metodologias em rodovias brasileiras, especialmente em regiões montanhosas, ainda é limitada. Nesse cenário, surge a necessidade de compreender quais fatores estão associados aos acidentes, quais trechos representam maior risco e em que medida técnicas de modelagem podem apoiar medidas preventivas.

A partir do problema apresentado, este estudo busca responder às seguintes questões:

- Quais são os tipos de acidentes mais recorrentes na Serra do Mar e quais fatores geométricos, operacionais e ambientais influenciam sua ocorrência?
- Quais segmentos da Serra do Mar podem ser classificados como pontos críticos?
- Quais medidas de engenharia podem contribuir para reduzir o número e a

gravidade dos acidentes nos trechos críticos identificados?

- Os modelos preditivos aplicados apresentaram desempenho adequado para estimar a probabilidade de acidentes e apoiar decisões futuras de segurança viária?

1.2 OBJETIVO

Identificar os pontos críticos com maior incidência de acidentes em trechos da Serra do Mar e empregar modelos preditivos para estimar a ocorrência desses eventos.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os pontos críticos de acidentes na Serra do Mar e propor melhorias com base em modelos preditivos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar e compreender o atual cenário dos trechos da Serra do Mar quanto à ocorrência de acidentes e aos métodos de prevenção existentes;
- Analisar os fatores que contribuem para os acidentes;
- Desenvolver propostas de aprimoramento da segurança nos pontos críticos identificados;
- Avaliar o desempenho dos modelos propostos a partir dos parâmetros observados nos trechos estudadas.

1.2.3 Justificativa

A segurança viária é um dos maiores desafios enfrentados pelas sociedades contemporâneas, especialmente em países em desenvolvimento, onde o crescimento da frota de veículos não tem sido acompanhado, em muitos casos, pela modernização e manutenção adequada da infraestrutura rodoviária. No Brasil, os acidentes de trânsito configuram-se como uma das principais causas de mortes e hospitalizações, além de gerar elevados custos econômicos e sociais, conforme apontam dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) e do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2006).

Dentro desse cenário, as rodovias localizadas em áreas montanhosas apresentam condições ainda mais críticas devido às características geométricas adversas, como curvas acentuadas, declividades e presença constante de fenômenos climáticos como chuva e neblina. A Serra do Mar, é um exemplo emblemático de região que reúne alto fluxo de tráfego, especialmente de veículos pesados, e elevada taxa

de acidentes, tornando-se, portanto, um ponto estratégico para pesquisas voltadas à segurança viária.

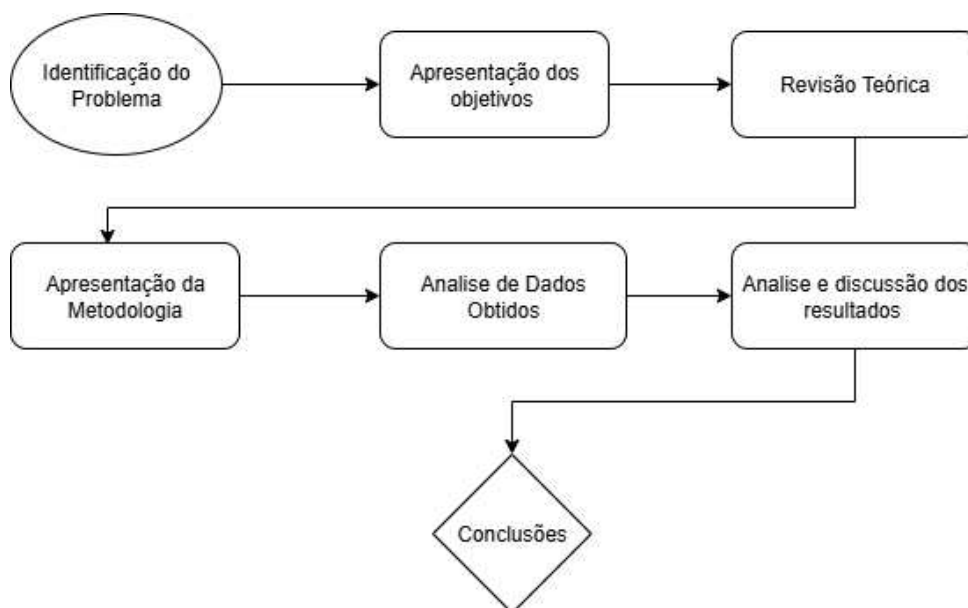
Do ponto de vista científico, este estudo contribui ao aplicar metodologias preditivas, integrando dados reais fornecidos por órgãos oficiais e pela concessionária Arteris, o que oferece uma base sólida para análises de segurança.

Por fim, ao propor uma análise baseada em dados reais fornecidos por órgãos oficiais, este trabalho busca oferecer uma base sólida para a proposição de medidas preventivas e corretivas, auxiliando na redução de acidentes e suas consequências. Assim, a justificativa deste estudo fundamenta-se tanto na sua relevância social e econômica quanto na sua contribuição científica e prática para a melhoria da segurança em rodovias brasileiras.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Considerando a problemática apresentada, este trabalho tem como objetivo aprofundar a discussão do tema, visando propor o modelo mais adequado à realidade analisada. A Figura 1 apresenta a proposta metodológica adotada no atual trabalho.

Figura 1 – Estrutura do Trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Conforme ilustrado na Figura 1, o presente trabalho está estruturado em seis capítulos, iniciando pela introdução, contextualizando o tema, justificando sua relevância e explicitando os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo trata do referencial teórico, trazendo o estado da arte em modelos de desempenho da segurança viária e detalhando os principais modelos estatísticos empregados na previsão de acidentes.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, detalhando as etapas, os dados necessários e a forma de coleta e tratamento dessas informações, fundamentadas na teoria discutida anteriormente. O quarto capítulo corresponde ao estudo de caso, no qual a teoria e a metodologia são aplicadas à realidade estudada. Nesse capítulo, são apresentadas todas as etapas, desde a obtenção e o tratamento dos dados até a implementação dos modelos e a análise dos resultados obtidos. O quinto capítulo discute os resultados e avalia a aplicabilidade das abordagens adotadas no contexto da Serra do Mar.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as considerações finais, destacando as principais conclusões do estudo e apontando sugestões para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos para análise desenvolvida ao longo do estudo. São discutidos temas, como segurança viária, acidentes de trânsito, identificação de pontos críticos, características de rodovias em regiões montanhosas, diretrizes do Highway Safety Manual (HSM) e modelos preditivos aplicados. Cada um desses elementos compõe a base teórica para compreender a dinâmica dos acidentes e orientar as metodologias adotadas nas etapas subsequentes deste trabalho.

2.1 SEGURANÇA VIÁRIA

A segurança viária é compreendida como o conjunto de ações, estratégias e políticas voltadas para reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes e, sobretudo, a gravidade de seus desfechos. Trata-se de um campo multidisciplinar, que abrange áreas como engenharia de transportes, psicologia, economia, saúde pública e formulação de políticas públicas (PEDEN et al., 2004). Esse caráter transversal reforça a necessidade de abordagens integradas e preventivas, orientadas para a preservação da vida.

O gerenciamento da segurança viária consiste na aplicação de técnicas de análise e ações com o propósito de aprimorar o desempenho do sistema viário, especialmente no que diz respeito à segurança (CARDOSO, 2006). Autores clássicos da área destacam que a segurança no trânsito não deve ser vista apenas como responsabilidade individual dos condutores, mas como resultado da interação entre múltiplos fatores. HAUER (1997) argumenta que a probabilidade de ocorrência de acidentes está diretamente relacionada à interação entre o comportamento humano, as características da via e as condições ambientais. Nessa perspectiva, a segurança deve ser compreendida como parte do próprio sistema de transporte, e não apenas como uma consequência das escolhas individuais.

Nesse contexto, uma contribuição fundamental para o avanço desse campo foi a consolidação da abordagem conhecida como *Safe System*, promovida pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD; ITF, 2025). Essa abordagem reconhece que erros humanos são inevitáveis e, portanto, o sistema deve ser projetado para minimizar as consequências desses erros. Assim, vias, veículos, usuários e gestores compartilham a responsabilidade pela segurança.

ELVIK (2009) sintetiza as medidas de segurança viária em quatro categorias principais: comportamento dos condutores, melhorias na infraestrutura viária, aprimoramentos tecnológicos nos veículos e políticas de gestão do tráfego. A eficácia dessas medidas depende de sua aplicação combinada e contínua, uma vez que

nenhum fator isolado é capaz de eliminar o risco de acidentes.

O fortalecimento dessa visão sistêmica foi impulsionado pelo lançamento do relatório mundial sobre prevenção de lesões no trânsito, publicado pela Organização Mundial da Saúde e do Banco Mundial (PEDEN et al., 2004). Esse documento consolidou a percepção dos acidentes de trânsito como um problema de saúde pública global, enfatizando a necessidade de investimentos em prevenção, monitoramento e pesquisa científica. A partir dele, trouxe a segurança viária para o centro das agendas internacionais de saúde e desenvolvimento sustentável.

Por fim, autores como WEGMAN (2017) destaca que o futuro da segurança viária depende da adoção de políticas fundamentadas em evidências científicas e da integração de tecnologias emergentes, como sistemas avançados de assistência ao condutor e veículos autônomos. Tais inovações, entretanto, só atingem seu potencial quando articuladas a políticas públicas consistentes, capazes de garantir equidade no acesso à mobilidade segura.

Portanto, a segurança viária deve ser entendida como uma dimensão essencial da mobilidade, com impactos diretos no bem-estar social, na economia e na sustentabilidade do transporte. Mais do que prevenir acidentes, trata-se de promover um sistema de mobilidade que reconheça as limitações humanas e reduza os riscos inerentes do tráfego.

2.1.1 Acidentes de Trânsito

A compreensão dos acidentes de trânsito constitui parte fundamental da segurança viária, uma vez que esses eventos resultam da interação complexa entre fatores humanos, infraestruturais e ambientais (ELVIK, 2009). Estudos clássicos demonstram que não há causa única para a ocorrência de acidentes, mas combinações de fatores que determinam sua probabilidade e severidade (ELVIK, 2009).

De acordo com a literatura especializada, acidentes de trânsito podem ser definidos como eventos imprevistos que resultam em danos materiais, lesões ou mortes, envolvendo veículos e usuários da via (HAUER, 1997). A classificação desses eventos geralmente segue critérios de gravidade, distinguindo-se entre acidentes leves, que causam apenas danos materiais ou ferimentos sem risco de morte; acidentes graves, que resultam em lesões que demandam atenção médica e podem gerar incapacidades temporárias ou permanentes; e acidentes fatais, que ocasionam a morte de um ou mais envolvidos.

Essa categorização é fundamental, pois orienta a avaliação dos impactos sociais e econômicos decorrentes das ocorrências e contribui para a priorização de medidas preventivas. Entre os fatores que contribuem para a ocorrência de acidentes, os humanos se destacam como os mais determinantes, a psicologia do trânsito mostra que aspectos como percepção de risco, tomada de decisão e influência social moldam

o comportamento dos condutores. Em situações de fadiga ou pressão, por exemplo, os motoristas tendem a cometer mais erros, especialmente em rodovias que apresentam maior complexidade operacional (DINGUS et al., 2006).

No entanto, não apenas o fator humano deve ser considerado. A infraestrutura viária exerce influência direta sobre a segurança e pode potencializar ou mitigar os riscos. Elementos como geometria da via, qualidade do pavimento, sinalização, iluminação e presença de dispositivos de contenção desempenham papel decisivo na prevenção de acidentes. Quando mal planejados, esses elementos tornam-se pontos críticos, como curvas fechadas, interseções mal projetadas e ausência de acostamentos, que figuram entre as causas recorrentes de acidentes em rodovias (ELVIK, 2009).

Somando-se a isso, as condições ambientais também se mostram decisivas. Chuvas intensas, neblina e pistas molhadas reduzem a aderência dos pneus, aumentam o tempo de frenagem e diminuem a visibilidade dos motoristas (FAOUZI et al.,). A combinação entre infraestrutura inadequada e fatores climáticos adversos potencializa os riscos, sendo particularmente crítica em regiões de relevo acidentado, como áreas montanhosas.

Outro aspecto relevante diz respeito à vulnerabilidade de determinados grupos de usuários. Entre eles, destacam-se os pedestres, frequentemente expostos a atropelamentos, sobretudo em áreas urbanas ou em travessias com sinalização inadequada; os ciclistas, suscetíveis a colisões com veículos motorizados; e os motociclistas, que apresentam elevadas taxas de mortalidade e maior severidade dos ferimentos em acidentes. A análise desses grupos demonstra que os impactos dos sinistros viários não se distribuem de maneira homogênea entre os diferentes perfis de usuários, reforçando a necessidade de estratégias específicas de mitigação e de políticas direcionadas à sua proteção.

Além disso, os acidentes de trânsito geram impactos que extrapolam as vítimas diretamente envolvidas. Socialmente, afetam famílias e comunidades, provocando traumas físicos e psicológicos (PEDEN et al., 2004). Economicamente, implicam custos elevados relacionados à saúde, seguros, danos materiais e perda de produtividade (ELVIK, 2009). Em termos ambientais, acidentes envolvendo cargas perigosas podem causar graves danos a ecossistemas, sobretudo em rodovias que transportam produtos químicos e combustíveis.

Por fim, é importante destacar que acidentes em rodovias apresentam características distintas daqueles ocorridos em ambiente urbano. Em vias rurais e rodovias, as velocidades médias são mais elevadas, o que potencializa a gravidade dos mesmos. Nessas vias, são comuns acidentes do tipo saída de pista, colisões traseiras e tombamentos, especialmente em segmentos com curvas acentuadas ou declividades elevadas. A participação significativa de veículos pesados intensifica ainda mais a severidade dos eventos (LEE et al., 2021).

Dessa forma, ao integrar os fatores humanos, infraestruturais, ambientais e sociais, bem como as especificidades dos diferentes grupos de usuários e das rodovias, torna-se possível construir uma compreensão abrangente da dinâmica dos acidentes de trânsito. Essa visão multifatorial é essencial não apenas para o diagnóstico, mas também para a formulação de estratégias de prevenção, a definição de políticas públicas e o avanço no desenvolvimento de modelos preditivos que contribuam para a redução da sinistralidade viária.

A compreensão da dinâmica dos acidentes de trânsito, bem como dos fatores que influenciam sua ocorrência e gravidade, permite avançar da análise geral para a identificação de trechos onde esses eventos se concentram. Assim, a partir do entendimento dos elementos que aumentam o risco, torna-se possível investigar os chamados pontos críticos em rodovias.

2.2 PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS

A identificação de pontos críticos em rodovias constitui uma etapa essencial para a gestão da segurança viária, uma vez que permite direcionar esforços e priorizar intervenções em trechos que apresentam maior risco de acidentes. Esses pontos críticos, também chamados de trechos ou locais de concentração de acidentes, são definidos como segmentos da via em que a frequência ou a gravidade dos sinistros excede significativamente a média observada no restante da rodovia (HAUER, 1997).

Historicamente, a análise desses trechos tem se apoiado em estatísticas de acidentes registradas por órgãos oficiais, como a Polícia Rodoviária Federal, e pelas concessionárias responsáveis pela operação das rodovias. A partir desses registros, diferentes métodos têm sido empregados para quantificar e visualizar a concentração de sinistros. Entre os mais utilizados estão o Índice de Frequência de Acidentes (IFA), que relaciona o número de acidentes à extensão do trecho analisado; o Índice de Gravidade de Acidentes (IGA), que pondera as ocorrências segundo sua severidade; e o mapeamento geográfico, baseado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permite visualizar espacialmente os pontos onde os acidentes se acumulam e identificar padrões relevantes (HAUER, 1997).

Com o avanço das técnicas analíticas, métodos estatísticos mais robustos passaram a complementar essas abordagens descritivas, oferecendo maior precisão na identificação de trechos críticos. Entre esses modelos destacam-se as regressões de Poisson e Binomial Negativa, amplamente utilizadas para analisar a frequência de acidentes considerando variáveis explicativas relacionadas às características geométricas, operacionais e ambientais da via (HAUER, 1983). Além disso, em cenários onde há grande quantidade de trechos sem registro de acidentes, situação comum em redes rodoviárias extensas, modelos do tipo zero-inflated tornam-se adequados, pois

lidam com o excesso de zeros e com a alta variabilidade dos dados, proporcionando estimativas mais consistentes (DOMENCICH; MCFADDEN, 1975).

Essas abordagens permitem distinguir trechos cuja elevada concentração de acidentes ocorre por variabilidade aleatória daqueles que, de fato, apresentam risco significativamente elevado, possibilitando a alocação de recursos de forma mais precisa e eficiente. Para isso, diferentes indicadores têm sido empregados na caracterização de pontos críticos, como o número de acidentes por quilômetro por ano, a taxa de acidentes fatais e graves em relação ao tráfego médio diário, além de índices compostos que ponderam simultaneamente frequência, severidade e volume de tráfego (ELVIK, 2009). A utilização conjunta desses indicadores proporciona uma avaliação mais abrangente do segmento, contemplando tanto a probabilidade de ocorrência quanto o potencial impacto dos acidentes.

No contexto brasileiro, essas metodologias vêm sendo amplamente aplicadas em rodovias federais e estaduais, com estudos baseados em dados da Polícia Rodoviária Federal e de concessionárias. Relatórios da Arteris S.A. (2023) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021) evidenciam segmentos com alta concentração de sinistros, destacando curvas acentuadas, declividades elevadas e interseções mal sinalizadas como fatores determinantes. A partir dessas análises, têm sido priorizadas intervenções como melhorias geométricas, instalação de dispositivos de contenção, reforço da sinalização vertical e horizontal e campanhas educativas direcionadas a motoristas e usuários vulneráveis.

Dessa forma, a identificação de pontos críticos se revela fundamental para direcionar investimentos de maneira eficiente, reduzir acidentes graves e fatais e apoiar a elaboração de modelos preditivos capazes de antecipar riscos e orientar ações preventivas. Em síntese, a análise de pontos críticos combina dados históricos, indicadores de risco e metodologias estatísticas, proporcionando uma visão objetiva e confiável dos trechos que demandam atenção prioritária na gestão da segurança viária.

2.2.1 Rodovias em Regiões Montanhosas

A análise dos pontos críticos em rodovias demonstra que determinados trechos concentram maior risco devido à interação entre fatores geométricos, operacionais e ambientais. No entanto, essa concentração de sinistros torna-se ainda mais evidente em contextos específicos, especialmente em segmentos onde as condições da via acentuam a probabilidade de acidentes. É nesse cenário que se destacam as rodovias localizadas em regiões montanhosas, cujas características particulares reforçam a necessidade de avaliar com precisão os pontos críticos.

Em regiões montanhosas apresentam características geométricas e operacionais que aumentam significativamente a complexidade do tráfego e tornam determinados trechos mais propensos a acidentes graves. Nessas áreas, a identificação

de pontos críticos é ainda mais importante, pois permite priorizar intervenções em locais onde as condições naturais e estruturais elevam substancialmente o risco de sinistros (AZARI et al., 2023). Entre os fatores que contribuem para a criticidade desses trechos destacam-se elementos geométricos, como curvas acentuadas, declives prolongados e variações abruptas de altitude, que intensificam o risco de colisões e saídas de pista (ZHANG et al., 2021).

Além disso, condições de visibilidade frequentemente prejudicadas, como neblina densa, chuva intensa e sombras produzidas pelo relevo, reduzem a percepção dos condutores e dificultam manobras seguras (ELYASSAMI; HAMID; HABUZA, 2021). O tipo de tráfego também influencia significativamente, sobretudo em trechos com grande circulação de veículos pesados, cuja massa e inércia aumentam a gravidade dos acidentes (ECK; FRENCH, 2002). Por fim, a ausência ou deficiência de dispositivos de proteção, como barreiras metálicas, acostamentos adequados e sinalização apropriada, amplia a vulnerabilidade desses segmentos e contribui para a ocorrência de acidentes fatais (Federal Highway Administration (FHWA), 2013).

A identificação de pontos críticos em rodovias montanhosas combina métodos tradicionais de análise de acidentes com ferramentas estatísticas e geoespaciais, de forma a captar com precisão os trechos mais vulneráveis. Entre essas abordagens, destacam-se a análise de dados históricos, que permite localizar segmentos com maior frequência e gravidade de sinistros (AZARI et al., 2023); o uso de indicadores de risco ponderados, que integram frequência, severidade e volume de tráfego ajustados às particularidades do relevo montanhoso (ZHANG et al., 2021); e técnicas de georreferenciamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que possibilitam visualizar espacialmente a concentração das ocorrências e identificar padrões relevantes (ECK; FRENCH, 2002).

Além disso, modelos preditivos, baseados em regressões estatísticas, ampliam a capacidade de antecipar trechos de risco elevado, considerando variáveis geométricas, ambientais e operacionais típicas de regiões montanhosas (ELYASSAMI; HAMID; HABUZA, 2021). A identificação desses segmentos críticos é especialmente importante devido ao elevado potencial de acidentes graves e fatais nesses cenários, permitindo priorizar investimentos em infraestrutura, como melhoria de curvas, instalação de barreiras de contenção e reforço da sinalização; planejar estratégias específicas de controle operacional, como limites de velocidade diferenciados (Federal Highway Administration (FHWA), 2013); e reduzir impactos sociais, econômicos e logísticos decorrentes de sinistros (AZARI et al., 2023). Assim, a análise de pontos críticos em rodovias montanhosas constitui instrumento essencial para a gestão da segurança viária, pois viabiliza intervenções precisas, eficientes e fundamentadas em evidências.

2.3 MODELOS PREDITIVOS DE ACIDENTES

A compreensão dos pontos críticos em rodovias, especialmente em trechos montanhosos onde os riscos são intensificados por condições geométricas, ambientais e operacionais, evidencia a necessidade de ferramentas capazes de antecipar padrões de sinistralidade e orientar intervenções de engenharia com maior precisão. Nesse contexto, os modelos preditivos de acidentes desempenham papel fundamental, pois permitem estimar a probabilidade de ocorrência e a severidade dos sinistros com base em variáveis relacionadas à via, ao tráfego e ao ambiente (HAUER, 1983). Essas metodologias fornecem suporte técnico para decisões de planejamento e políticas de segurança viária, tornando possível reduzir a frequência e a gravidade de acidentes de forma mais direcionada.

Os modelos preditivos podem ser agrupados em três categorias principais: estatísticos, probabilísticos/bayesianos e baseados em inteligência artificial (IA). Os modelos estatísticos são amplamente utilizados na análise de padrões de acidentes e na estimativa de suas frequências a partir de variáveis explicativas relacionadas à via, ao tráfego e ao ambiente. Entre as abordagens mais comuns está a regressão de Poisson, frequentemente aplicada para modelar a frequência de acidentes em trechos rodoviários, especialmente quando se trata de eventos discretos e relativamente raros, considerando fatores como volume de tráfego e condições geométricas e ambientais (HAUER, 1983).

Outra técnica relevante são os modelos de contagem, que permitem prever a ocorrência de acidentes em locais específicos e identificar segmentos com maior probabilidade de sinistros, sendo úteis na priorização de pontos críticos (SILVA; ANDRADE; FERREIRA, 2020). Além disso, a regressão logística é amplamente empregada para estimar a probabilidade de ocorrência de acidentes, a partir de variáveis contínuas e categóricas, como tipo de veículo, geometria da via e condições climáticas. Entre as principais vantagens desses modelos destacam-se a fácil interpretação, a fundamentação estatística consolidada e a forte aplicabilidade a dados históricos. Entretanto, apresentam limitações, especialmente quanto à capacidade de capturar relações não lineares complexas e interações entre múltiplos fatores, o que pode demandar metodologias complementares em cenários mais dinâmicos ou heterogêneos.

Modelos probabilísticos ou bayesianos, por sua vez, incorporam conhecimentos prévios e atualizam continuamente as previsões à medida que novos dados se tornam disponíveis. Essa abordagem possibilita estimar a probabilidade de acidentes ajustando seus parâmetros conforme novas informações são coletadas, o que os torna particularmente eficazes em cenários com dados escassos ou incompletos, situação comum em trechos de rodovias montanhosas (HAUER, 1983). Entre suas principais

vantagens destacam-se a capacidade de atualização contínua e a robustez na gestão de incertezas e lacunas nos dados. Contudo, esses modelos apresentam limitações relacionadas à maior complexidade computacional e à necessidade de conhecimento prévio sobre a distribuição das variáveis analisadas, o que pode dificultar sua aplicação em contextos com baixa disponibilidade de informações especializadas.

Esses modelos apresentam vantagens importantes, como elevada precisão em cenários complexos, capacidade de processar um grande volume de variáveis e habilidade para identificar interações não lineares, frequentemente presentes em sistemas rodoviários. No entanto, também possuem limitações: demandam grandes quantidades de dados para treinamento, apresentam menor interpretabilidade em comparação com modelos estatísticos tradicionais e requerem maior capacidade computacional, especialmente em aplicações mais sofisticadas (SILVA; ANDRADE; FERREIRA, 2020).

Esses modelos são amplamente aplicados no contexto da segurança viária para apoiar decisões estratégicas e operacionais. Uma de suas principais funções é identificar trechos críticos em rodovias, permitindo priorizar intervenções de engenharia, fiscalização e gestão do tráfego. Além disso, possibilitam prever a frequência e a gravidade dos acidentes, o que contribui para estimar impactos sociais, econômicos e ambientais associados aos sinistros. Também são empregados na avaliação da eficácia de medidas mitigadoras, como a melhoria de curvas, a instalação de barreiras de contenção e a adequação de limites de velocidade, fornecendo evidências sobre o potencial de redução de riscos após intervenções específicas.

Outro uso relevante refere-se à integração de dados históricos de acidentes, aos modelos previstos no Highway Safety Manual (HSM), o que permite aprimorar a precisão das estimativas e adaptar os parâmetros à realidade local (AASHTO, 2010). A articulação entre modelos estatísticos, probabilísticos/bayesianos e técnicas de inteligência artificial proporciona uma análise mais robusta e abrangente, incorporando tanto padrões históricos quanto relações complexas entre fatores geométricos, climáticos e operacionais.

De forma geral, a aplicação de modelos preditivos em rodovias críticas tem se mostrado uma estratégia eficaz para antecipar acidentes, orientar intervenções e embasar políticas públicas de segurança viária. Estudos conduzidos no Brasil e no exterior demonstram o potencial dessas ferramentas para reduzir significativamente a frequência e a severidade dos sinistros, reforçando sua relevância para a gestão moderna da segurança rodoviária (HAUER, 1983).

A aplicação desses modelos permite identificar trechos críticos, prever a frequência e gravidade de acidentes, avaliar a eficácia de intervenções de segurança e integrar dados históricos fornecidos por órgãos gestores e concessionárias, como ocorre na Serra do Mar. Nesse sentido, destaca-se a metodologia consolidada

pelo Highway Safety Manual (HSM), que representa uma estrutura padronizada e amplamente utilizada internacionalmente para previsão de acidentes e avaliação de intervenções de segurança. O HSM baseia-se em funções de desempenho de segurança (Safety Performance Functions), fatores de modificação de acidentes (Crash Modification Factors) e no método Empírico-Bayes, combinando dados observados e estimados para gerar previsões mais robustas (AASHTO, 2010).

2.3.1 Highway Safety Manual

A efetividade dos modelos preditivos, sejam estatísticos ou bayesianos, depende diretamente da existência de metodologias consolidadas que orientem sua aplicação prática e garantam resultados consistentes. Nesse sentido, uma das principais referências internacionais que integra e padroniza essas abordagens é o *Highway Safety Manual* (HSM). Publicado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), o HSM destaca-se por reunir princípios de engenharia de tráfego, estatística e análise de risco em um único sistema metodológico, oferecendo ferramentas robustas para a previsão de acidentes e para a avaliação da segurança viária (AASHTO, 2010).

O manual busca uniformizar procedimentos, reduzir a subjetividade nas decisões técnicas e fornecer fundamentos quantitativos que orientem desde o diagnóstico de problemas até o planejamento de intervenções em rodovias. Estruturado em quatro partes, o HSM apresenta conceitos fundamentais, técnicas de avaliação de projetos, métodos de análise operacional e modelos de previsão de acidentes, tornando-se uma base essencial para profissionais e pesquisadores interessados em aplicar abordagens preditivas com rigor técnico e comparabilidade internacional (AASHTO, 2010).

O HSM oferece um conjunto abrangente de métodos para estimar a frequência e a severidade de acidentes, incorporando modelos de regressão como Poisson e Binomial Negativa, ajustados a fatores geométricos, ambientais e de tráfego. Além disso, utiliza o conceito de Expected Crash Frequency para identificar trechos críticos com maior risco e permite simular intervenções, como melhorias geométricas, instalação de barreiras, aperfeiçoamento da sinalização e ajustes de velocidade, a fim de estimar reduções potenciais de acidentes (AASHTO, 2010).

Embora criado para o contexto dos Estados Unidos, o HSM tem sido aplicado em rodovias brasileiras mediante adaptações regionais, que envolvem a integração de dados históricos de acidentes de instituições como a PRF e concessionárias rodoviárias (Arteris S.A., 2023), além de ajustes nos modelos para refletir características específicas do país, como composição do tráfego, clima e geomorfologia, especialmente relevantes em trechos montanhosos. Essa adaptabilidade permite que o manual sirva de suporte à priorização de investimentos em infraestrutura e à formulação de políticas públicas

direcionadas à redução de acidentes graves e fatais.

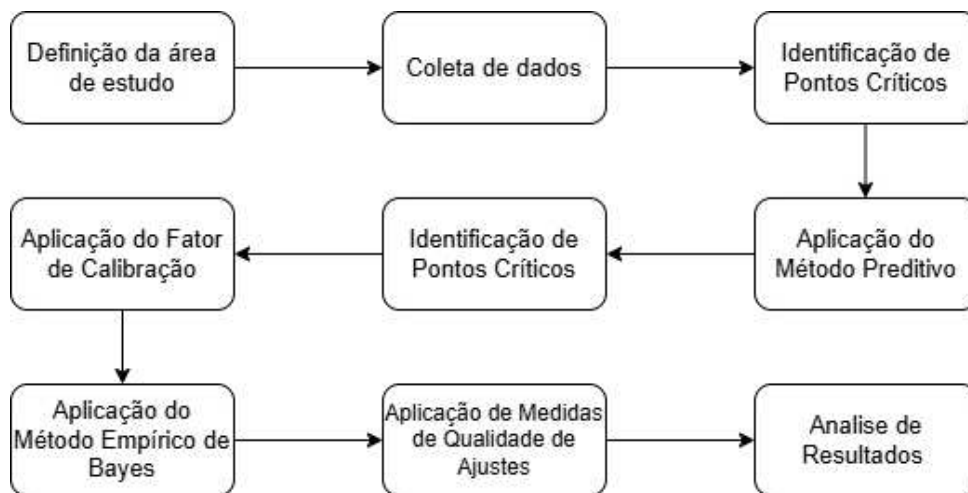
Assim, o HSM configura uma ferramenta de grande relevância tanto acadêmica quanto prática, fornecendo uma base metodológica robusta que favorece uma gestão mais eficiente da segurança viária e que pode ser integrada de forma direta ao estudo de pontos críticos e à aplicação de modelos preditivos em rodovias brasileiras, como no caso em questão.

3 METODOLOGIA

Com base nos conceitos apresentados que abordaram os fatores determinantes dos acidentes de trânsito, a identificação de pontos críticos em rodovias, as particularidades de trechos montanhosos e a aplicação de modelos preditivos segundo o Highway Safety Manual (HSM), se torna possível estruturar a abordagem metodológica deste estudo. A partir desses referenciais, a metodologia foi elaborada com o objetivo de aplicar, de forma sistemática, os procedimentos de coleta, tratamento e análise dos dados de acidentes na Serra do Mar.

Para uma melhor compreensão das etapas metodológicas adotadas, será apresentado o fluxograma na Figura , que destaca visualmente o processo de desenvolvimento deste estudo.

Figura 2 – Fluxograma Metodologia



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

3.1 IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRITICOS

De acordo com o Manual de Identificação, do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 1987) um ponto crítico é caracterizado pela concentração de acidentes acima da média da rodovia, refletindo maior risco potencial para os usuários. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2021) um ponto crítico é definido como um segmento de rodovia cuja frequência de acidentes excede um limite considerado aceitável, calculado a partir de métodos estatísticos baseados na média e no desvio padrão das ocorrências.

A metodologia proposta pelo DENATRAN (1987) utiliza taxas de acidentes baseadas em Unidades Padrão de Severidade (UPS), que consideram o número de

acidentes ponderado de acordo com a gravidade dos envolvidos.

Para quantificar o grau de severidade dos acidentes, são atribuídos pesos diferenciados a cada tipo de ocorrência, com base em estudos de determinação de custos. Assim, acidentes que resultam apenas em danos materiais recebem peso 1, aqueles que envolvem feridos recebem peso 5, enquanto acidentes fatais são ponderados com peso 13.

$$UPS = (N_{\text{danos materiais}} \times 1) + (N_{\text{feridos}} \times 5) + (N_{\text{fatais}} \times 13) \quad (1)$$

Onde:

UPS = Unidade Padrão de Severidade;

$N_{\text{danos materiais}}$ = número de acidentes com danos materiais;

N_{feridos} = número de acidentes com feridos;

e N_{fatais} = o número de acidentes fatais;.

Para taxa de severidade, é considerado o volume médio diário de veículos e a extensão do segmento, o que permite identificar os pontos que apresentam maior risco e podem ser classificadas como pontos críticos.

$$T = \frac{UPS \cdot 10^6}{VMD \cdot 365 \cdot L} \quad (2)$$

Onde:

VDM = Volume médio diário de veículos;

L = Extensão do trecho;

3.2 MODELAGEM PREDITIVA

Em complemento aos referenciais e metodologias nacionais, o *Highway Safety Manual* (HSM), publicado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), configura-se como a principal referência internacional em segurança viária. A adoção do HSM é fundamental para este estudo, pois ele oferece uma abordagem sistemática e quantitativa para a avaliação de desempenho de segurança. O manual introduz as *Safety Performance Functions* (SPFs), modelos estatísticos essenciais que relacionam a frequência esperada de acidentes às características geométricas da via e ao volume de tráfego, conforme estabelecido na referência da (AASHTO, 2010).

Para o contexto de rodovias de pista dupla, o método preditivo do HSM (AASHTO, 2010) é estruturado para estimar a média esperada, os tipos e a severidade dos acidentes em segmentos de via com características conhecidas. Essa estimativa é tipicamente representada pela relação na Equação 3:

$$N_{previsto,rd} = N_{spf,rd} \cdot C_r \cdot (AMF_{1rd} \cdot AMF_{2rd} \cdot \dots \cdot AMF_{5rd}) \quad (3)$$

Onde:

$N_{previsto,rd}$ = número previsto de acidentes para um segmento no ano selecionado;

$N_{spf,rs}$ = número médio de acidentes em um trecho de rodovia dividida com condições básicas;

C_r = fator de calibração para segmentos rodoviários de um tipo específico;

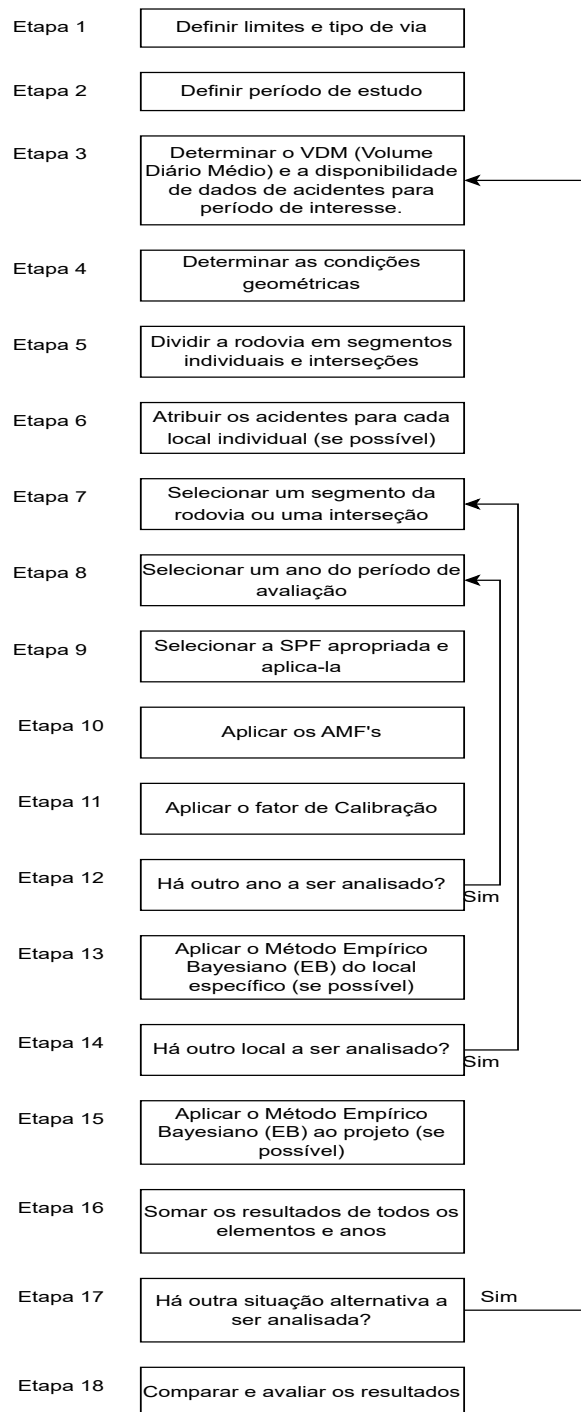
$AMF_{1rd} \dots AMF_{5rd}$ = Fatores de Modificação de Acidentes para segmentos de rodovia divididos;

Dando continuidade à aplicação do método preditivo estabelecido no HSM, é fundamental reconhecer sua abordagem, que compreende um total de 18 etapas para a estimativa da frequência média esperada de acidentes (AASHTO, 2010).

O princípio operacional central para a análise de segurança reside na segmentação da rodovia em trechos homogêneos. Esta divisão é necessária, pois garante que cada segmento individual analisado possua volume de tráfego, características geométricas e condições operacionais constantes. A estimativa da frequência acidentária é, portanto, realizada para um período de tempo específico de interesse (em anos), garantindo que as variáveis de geometria e os recursos de controle de tráfego permaneçam inalterados e que o volume de tráfego seja conhecido ou projetado.

A Figura 3 mostra as 18 etapas necessárias para a aplicação do método preditivo do HSM (AASHTO, 2010), fornecendo as etapas para a execução desta etapa do trabalho.

Figura 3 – Fluxograma Etapas do Modelo Preditivo



Fonte: Adaptado de AASHTO (2010)

O processo preditivo estabelecido pelo Highway Safety Manual (HSM) inicia-se com a delimitação do escopo do estudo. A Etapa 1 define a extensão da rodovia de interesse, que pode variar de um local específico a um conjunto de elementos viários

adjacentes. Em seguida, a Etapa 2 estabelece o período de análise, cuja definição é orientada pela disponibilidade histórica ou estimada de dados cruciais, como o Volume Médio Diário Anual (VMDA), registros de acidentes e informações geométricas.

Com o escopo temporal e espacial definidos, a Etapa 3 exige a determinação precisa do VMDA para o período de interesse. Se o estudo for prospectivo, o VMDA pode ser uma estimativa baseada em modelos de previsão; se for retrospectivo e houver lacunas, o Manual permite a interpolação ou repetição de valores conhecidos. É nesta etapa que, para rodovias existentes, se coletam também os dados históricos de acidentes necessários para a aplicação do Método Empírico de Bayes (EB).

Na sequência, a Etapa 4 concentra-se na determinação detalhada das condições geométricas e operacionais dos segmentos viários. A partir de todas essas informações, a Etapa 5 realiza a segmentação da rodovia, dividindo-a em elementos viários individuais, os trechos homogêneos e as interseções. Na Etapa 6, é desejável que os acidentes observados sejam atribuídos com precisão a cada elemento individual. A aplicação do método EB resulta no $N_{esperado}$, um resultado mais robusto que o $N_{previsto}$, sendo este último utilizado na impossibilidade de aplicação do EB.

As Etapas 7 à 14 conduzem o cálculo do $N_{previsto}$ para cada elemento individual e para cada ano do período de interesse, identificando as Safety Performance Functions (SPFs) adequadas e os Accident Modification Factors ($AMFs$ e C_x) correspondentes. Esta sequência também inclui o cálculo do $N_{esperado}$ via método EB, se aplicável.

A Etapa 15 atua como alternativa para o método EB, sendo aplicada quando os dados históricos de acidentes não podem ser atribuídos com precisão a elementos individuais; nesse caso, o EB é aplicado ao projeto como um todo.

Finalizando o método, a Etapa 16 totaliza os resultados de todos os elementos individuais para cada ano, determinando o número total previsto de acidentes para o período. A frequência média é obtida pela divisão desse total pelo número de anos do estudo. Na Etapa 17, questiona-se a necessidade de analisar alternativas de projeto ou cenários, como diferentes intervenções ou projeções de VMDA, o que exigiria a repetição das Etapas 3 a 16. Por fim, a Etapa 18 consiste na avaliação e comparação dos resultados obtidos, fornecendo a base para as conclusões e recomendações do estudo.

Este rigor metodológico da previsão de acidentes, detalhado nas 18 etapas, depende de uma correta subdivisão da rede viária em elementos individuais. Conforme estabelecido na Etapa 5 do processo, cada elemento é categorizado como interseção ou Trecho Homogêneo (TH), e cada um constitui uma unidade de análise distinta.

Os Trechos Homogêneos (THs), são definidos como segmentos viários que mantêm características uniformes ao longo de sua extensão. Estes trechos tipicamente se estendem entre os centros de interseções consecutivas, sendo redefinidos apenas quando uma mudança estrutural relevante na via impõe uma nova delimitação. É crucial

ressaltar que, de acordo com o modelo, a medição do TH é sempre referenciada pelo centro do cruzamento.

O modelo preditivo do HSM é estruturado para avaliar a frequência de acidentes de forma específica em cada tipo de elemento. Nos trechos homogêneos, a previsão se concentra nos acidentes que são inerentes ao próprio segmento (área B) e que não estão relacionados à influência direta das interseções. Essa distinção é vital para garantir que a frequência de acidentes não seja contabilizada duplamente, permitindo uma análise precisa da contribuição de cada elemento para a segurança viária da rede.

O processo de segmentação da rede viária, parte fundamental da metodologia preditiva do HSM, resulta na criação de um conjunto de elementos viários contíguos de comprimento variável, sendo que cada um desses elementos apresenta características uniformes ao longo de sua extensão, como volumes de tráfego, características geométricas e recursos de controle de tráfego (AASHTO, 2010).

Os critérios específicos para a divisão dos Trechos Homogêneos (THs) variam conforme o tipo de elemento viário em análise. No caso específico de rodovias rurais de pista dupla, o HSM estabelece que um novo trecho deve ser iniciado no centro de uma interseção ou sempre que houver uma mudança em pelo menos uma das seguintes características da via (AASHTO, 2010): no Volume Médio Diário Anual (VMDA); na inclinação do talude lateral (sideslope) para segmentos sem divisão central; no tipo de acostamento; na presença de iluminação; ou na presença ou largura da divisão central (canteiro central).

Um ponto de atenção na aplicação do Manual é a ausência de diretrizes mais específicas para a divisão dos elementos individuais na presença de dispositivos automatizados para controle de velocidade, não sendo apresentados parâmetros claros como a área de influência desses equipamentos a ser considerada na segmentação. Por fim, embora o Manual não estabeleça uma limitação para a extensão máxima dos trechos homogêneos, ele indica que não devem ser divididos trechos com extensão inferior a 0,1 milhas (aproximadamente 160 metros). Esta recomendação visa minimizar o esforço na aplicação do método, considerando que trechos tão curtos não afetariam significativamente os resultados da predição.

Após a correta segmentação dos Trechos Homogêneos (THs) e a coleta das variáveis, a próxima etapa fundamental (Etapas 7 à 14) é o cálculo do número de acidentes base. Este cálculo é realizado através das Funções de Desempenho de Segurança (Safety Performance Functions). As SPFs são, essencialmente, modelos de regressão desenvolvidos para a previsão do número de acidentes sob as condições geométricas e operacionais definidas como "base" pelo modelo.

O resultado primário da aplicação dessas funções é o valor de N_{spf} , o número de acidentes esperado sob condições base. A Função de Desempenho de Segurança (SPF) utilizada para os trechos homogêneos de rodovias rurais de pista dupla é definida

pela seguinte relação, conforme estabelecido no HSM (AASHTO, 2010):

$$N_{spf,rd} = e^{(a+b \cdot \ln(AADT)+\ln(L))} \quad (4)$$

Onde

$N_{spf,rd}$ = número total de acidentes em trechos de rodovia por ano;

$AADT$ = Tráfego médio diário anual (veículos/dia) no trecho da rodovia;

L = extensão do trecho rodoviário (milhas);

$a = -9,025$;

$b = 1,049$.

A precisão e a confiabilidade são avaliadas pelo parâmetro de superdispersão. Conectando-se diretamente à equação da SPF, o parâmetro de superdispersão associado ao N_{spf} é calculado em função da extensão do trecho homogêneo, conforme a Equação 5 (AASHTO, 2010). Este parâmetro é uma medida estatística crucial, pois quanto mais próximo de zero ele estiver, maior será a confiabilidade estatística da SPF para prever o número de acidentes.

Em essência, ele quantifica o grau de dispersão dos dados de acidentes em relação à média prevista pelo modelo. Portanto, a inclusão desse parâmetro demonstra o rigor metodológico ao não apenas prever a frequência de acidentes, mas também ao avaliar a incerteza estatística associada a essa previsão.

$$k = \frac{1}{e^{(c + \ln(L))}} \quad (5)$$

Onde

k = parâmetro de sobredispersão associado ao segmento rodoviário;

L = extensão do trecho rodoviário (milhas);

$c = 1,549$.

Os valores dos parâmetros de regressão a , b e c são coeficientes específicos que dependem do tipo de elemento viário, que neste caso, é trechos com divisão central e o nível de severidade dos acidentes a ser estimado, sendo adotado a de acidentes totais.

3.2.1 Fatores de Modificação de Acidentes

Após o cálculo do valor base (N_{spf}) e a avaliação da sua confiabilidade estatística, o método preditivo exige o ajuste desse valor para refletir as condições reais do segmento de rodovia. Este ajuste é realizado através dos Fatores de Modificação

de Acidentes, AMF's (Accident Modification Factors). Os AMF's representam o impacto de diversas características geométricas e operacionais de um segmento, como, por exemplo, a largura das faixas de rolamento ou a inclinação dos taludes laterais.

No método preditivo, o N_{spf} é multiplicado por uma série de AMF's para ajustar a frequência média esperada de acidentes às condições específicas presentes em cada elemento individual. O primeiro Fator de Modificação de Acidentes (AMF_{1rd}) é responsável por representar os efeitos da largura da faixa de rolamento na frequência média de acidentes.

$$AMF_{1rd} = (AMF_{RA} - 1.0) \cdot P_{RA} + 1.0 \quad (6)$$

Onde

AMF_{1rd} = Fator de Modificação de Acidentes para o total de acidentes;

AMF_{RA} = Fator de Modificação de Acidente para acidentes relacionados;

P_{RA} = Proporção do total de acidentes constituídos por acidentes relacionados (o valor padrão é 0,50)

O valor do fator AMF_{RA} é determinado a partir da Tabela 1 com base na largura da faixa de rolamento e no volume de tráfego aplicável.

Tabela 1 – AMF_{RA} para tipos de colisão relacionados à largura da faixa

Largura de faixa	Tráfego Diário Médio Anual (veíc/dia)		
	< 400	400 a 2000	> 2000
9-ft	1.03	$1.03 + 1.38 \times 10^{-4}(AADT - 400)$	1.25
10-ft	1.01	$1.01 + 8.75 \cdot 10^{-5}(AADT - 400)$	1.15
11-ft	1.01	$1.01 + 1.25 \cdot 10^{-5}(AADT - 400)$	1.03
12-ft	1.00	1.00	1.00

Fonte: Adaptado de AASHTO (2010)

A aplicação do AMF_1 requer o uso do Fator de Proporção de Acidentes (PRA). Este parâmetro representa a proporção do total de acidentes que estão diretamente relacionados à característica geométrica em análise. O HSM fornece valores padrão para o PRA, de 0,50 para rodovias de pista dupla com divisão central (AASHTO, 2010). Embora estes valores padronizados sejam a base, o Manual permite sua atualização com base em dados de acidentes locais para aumentar a precisão da previsão.

Em seguida, o método preditivo incorpora o ajuste referente à largura do acostamento. Em rodovias de pista dupla com divisão central, o segundo Fator de Modificação de Acidentes, o AMF_{2rd} , é aplicado para contabilizar o efeito da largura do acostamento externo pavimentado. Desenvolvido por Lord et al. (2008), os valores do AMF_{2rd} são consultados na Tabela 2 do Manual, refletindo como variações na largura do acostamento influenciam a frequência de acidentes do segmento.

Tabela 2 – AMF_{2rd} para largura do acostamento para segmentos de rodovia divididos

Largura média do acostamento (ft)				
0	2	4	6	8 >
1.18	1.13	1.09	1.04	1.00

Fonte: Adaptado de AASHTO (2010)

O terceiro Fator de Modificação (AMF_3) é específico para a conformação viária do segmento. Para Rodovias de Pista Dupla com divisão central, o AMF_{3rd} está relacionado à largura e características do canteiro central. É importante ressaltar que se a divisão entre as faixas for uma barreira física, o AMF_{3rd} deve ser adotado como 1,0.

Tabela 3 – AMF_{3rd} para Largura do canteiro central em segmentos de rodovia divididos

Largura de canteiro central	AMF
10	1.04
20	1.02
30	1.00
40	0.99
50	0.97
60	0.96
70	0.96
80	0.95
90	0.94
100	0.94

Fonte: Adaptado de AASHTO (2010)

Dando continuidade aos ajustes das condições de segurança, o quarto Fator de Modificação de Acidentes (AMF_{4rd}), avalia o impacto da presença de iluminação no trecho homogêneo em estudo. Este fator, utiliza como condição 'base' a ausência de iluminação, para a qual o AMF_{4rd} é adotado como 1,0. Para os locais que são contemplados com iluminação, o fator AMF_{4rd} é calculado através da Equação 7 (AASHTO, 2010), resultando em um valor tipicamente menor que 1,0, refletindo a redução esperada na frequência de acidentes devido à melhor visibilidade noturna:

$$AMF_{4rd} = 1 - [(1 - 0.72 \cdot P_{inr} - 0.83 \cdot P_{pnr}) \cdot P_{nr}] \quad (7)$$

Onde

AMF_{4rd} = Fator de Modificação de Acidentes para o efeito da iluminação no total de acidentes;

P_{inr} = proporção do total de acidentes noturnos em trechos de rodovia sem iluminação que resultam em fatalidade ou ferimentos;

P_{pnr} = Proporção do total de acidentes noturnos em trechos de rodovia sem iluminação que envolvem apenas danos materiais;

P_{nr} = Proporção do total de acidentes em trechos de rodovia sem iluminação que ocorrem à noite.

A Tabela 4 apresenta os valores padronizados pelo HSM para estas proporções, sendo diferenciadas de acordo com a conformação viária específica do trecho homogêneo. Esses valores são cruciais para o cálculo do fator AMF_{4rd} . Contudo, o Manual incentiva fortemente os usuários a atualizarem estas estimativas com dados locais de acidentes, caso estejam disponíveis, de forma a aumentar a precisão do modelo preditivo para a realidade da rede viária em estudo.

Tabela 4 – Proporção de acidentes noturnos em trechos de rodovia sem iluminação

Tipo de via	P_{inr}	P_{pnr}	P_{nr}
4D	0.323	0.677	0.426

Fonte: Adaptado de AASHTO (2010)

AMF_{5rd} = Fiscalização automática de velocidade

Concluindo a sequência de ajustes baseados em características operacionais, o quinto Fator de Modificação de Acidentes AMF_{5rd} está relacionado à presença de dispositivos automatizados de controle de velocidade. Estes dispositivos tipicamente

utilizam radares, lasers ou vídeos/identificação fotográfica para detectar e registrar excessos de velocidade. A condição 'base' deste modelo é a ausência desses dispositivos, sendo o AMF_{5rd} igual a 1,0 para essa situação.

O Manual assume que a presença desses dispositivos não interfere significativamente na ocorrência de acidentes onde há apenas danos materiais (sem vítimas). Contudo, para acidentes que envolvem lesões (com vítimas), o AMF_{5rd} é adotado como 0,95 para locais que possuem tais equipamentos de controle de velocidade. Esse valor (0,95) sugere uma redução de 5% na frequência de acidentes com lesões, sendo baseado na proporção de acidentes que envolvem algum tipo de lesão, refletindo o efeito da moderação da velocidade na severidade dos acidentes.

3.2.2 Fator de Calibração

Com o cálculo da frequência de acidentes base (N_{spf}) e a aplicação sequencial dos Fatores de Modificação (AMFs) concluídos, com o $N_{previsto}$ para as condições geométricas e operacionais do segmento, é necessário incorporar o ajuste final: o Fator de Calibração (C_x). Uma vez que o HSM foi desenvolvido com base em dados de rodovias norte-americanas, os níveis de frequência de acidentes previstos podem variar substancialmente em outras regiões.

Essa variação pode ser atribuída a uma série de fatores, tais como diferenças nas condutas dos usuários, nas condições ambientais, ou até mesmo nos procedimentos dos sistemas de cadastro de acidentes (AASHTO, 2010). Dessa forma, o Fator de Calibração (C_x) é um fator de correção essencial para transferir a avaliação do modelo (método preditivo) para o novo local de aplicação (país, estado ou região). O Manual indica que a calibração deve ser realizada separadamente para cada tipo de elemento viário (THs), e o C_x pode representar um estado ou uma região geográfica específica, dependendo do horizonte e das características do estudo ((AASHTO, 2010).

O método de calibração é um procedimento formal de ajuste que segue uma sequência de cinco etapas (AASHTO, 2010), essencial para garantir que o modelo preditivo seja aplicado com precisão às condições locais. O processo se inicia com a Etapa 1, que é a identificação do tipo de elemento viário a ser calibrado. Em seguida, na Etapa 2, ocorre a seleção dos elementos viários para a calibração. Para que o conjunto de dados represente a região de forma avaliada, o Manual sugere um mínimo de 30 a 50 elementos individuais que, juntos, totalizem pelo menos 100 acidentes por ano. É crucial que a seleção dos locais seja feita aleatoriamente, sem viés baseado em altos índices de accidentalidade.

A Etapa 3 consiste na obtenção dos dados necessários, incluindo características geométricas, operacionais e o histórico de acidentes do local para o período de interesse, sendo recomendado que o período de calibração não ultrapasse três anos, a fim de mitigar a variação temporal na frequência média de acidentes. Na

Etapa 4, o método preditivo completo é aplicado nos locais de calibração.

O objetivo é obter a frequência esperada de acidentes ($N_{previsto}$), assumindo-se, inicialmente, que o Fator de Calibração (C_x) é igual a 1,0. Por fim, a Etapa 5 compreende o cálculo do Fator de Calibração (C_x) para a região delimitada, utilizando a razão entre a frequência total de acidentes observados e a frequência total de acidentes esperados.

O C_x é calculado pela razão entre a frequência total de acidentes observados (coletados na Etapa 3) e a frequência total de acidentes esperados (calculada na Etapa 4) em um mesmo grupo de elementos individuais e durante o mesmo período de tempo, conforme a Equação 8.

$$C_r = \frac{\sum \text{elementos} N_{\text{observado}}}{\sum \text{elementos} N_{\text{previsto}}} \quad (8)$$

Onde

C_r = Fator de Modificação de Acidentes para o efeito da iluminação no total de acidentes;

Complementando a Etapa 3 do método de calibração, que trata da obtenção dos dados necessários para a aplicação do método, o Manual fornece diretrizes específicas sobre as informações a serem coletadas. O HSM lista as características geométricas e operacionais que integram o método preditivo para rodovias rurais de pista dupla e as classifica como sendo necessárias ou desejáveis para um procedimento de calibração de trechos rodoviários, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Características para calibração do modelo de previsão de acidentes para rodovias rurais de pista dupla

Característica da via	Dados Necessarios	Dado Desejavel	Suposição Padrão
Extensão do trecho	x		Necessario
Volume de trafego (VMDA)	x		Necessario
Largura de Faixa	x		Necessario
Largura do acostamento	x		Necessario
Presença de Iluminação	x		Sem iluminação
Presença de dispositivos de controle de velocidade		x	Padrão Local
Largura de canteiro central	x		Necessario

Fonte: Adaptado de AASHTO (2010)

Essa distinção é importante pois as características necessárias são usadas para a SPF base, enquanto as desejáveis são usadas nos Fatores de Modificação (AMFs). Em situações nas quais os dados desejáveis de alguma característica da via não estão disponíveis, o Manual permite a adoção de uma condição base, garantindo que o processo de calibração possa ser concluído mesmo com algumas limitações nos dados locais.

3.2.2.1 Medidas de Qualidade de Ajustes

A transferência de modelos preditivos, como as Safety Performance Functions (SPFs) contidas no Highway Safety Manual (HSM), exige uma abordagem que inclua a avaliação do modelo ajustado com os dados da localidade em estudo.

Considerando que estudos recentes (SACCHI; PERSAUD; BASSANI, 2012) demonstram que o Fator de Calibração varia significativamente, mesmo em diferentes regiões, torna-se essencial avaliar o ajuste dos modelos calibrados para garantir a transferência das SPFs a diferentes tipos de elementos viários e contextos geográficos.

Para garantir a avaliação e a precisão da transferência dos modelos preditivos, esta pesquisa emprega um conjunto de três métricas convencionais de qualidade de ajuste, essenciais em estudos de modelagem de acidentes. O objetivo é quantificar a aderência dos modelos calibrados aos dados locais observados. As medidas selecionadas são: o R^2 Efron (pseudo- R^2), o Desvio Médio Absoluto (MAD) e o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE).

- MAD (Mean Absolute Deviance): Desvio Médio Absoluto, que indica o erro médio em unidades absolutas (número de acidentes);
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error): Erro Percentual Absoluto Médio, que expressa o erro em termos percentuais, facilitando a comparação entre diferentes redes viárias;
- R^2 Efron (Pseudo- R^2): Proposto por Efron (Hardin e Hilbe, 2007), uma métrica estatística de qualidade de ajuste.

O pseudo- R^2 de Efron é uma medida estatística para avaliar a qualidade de ajuste do modelo de previsão. Baseado na proposta de Efron (HARDIN; HILBE, 2007) e aplicado em trabalhos como o de (D'AGOSTINO, 2014), este indicador é calculado utilizando a Equação 9. Em sua interpretação, o R^2 Efron funciona de maneira análoga ao R^2 da regressão linear, valores mais próximos da unidade (1, 0) indicam um ajuste superior do modelo aos dados de acidentes observados. Ele serve, portanto, para avaliar o poder de explicação da estrutura matemática do modelo em relação à realidade da rede viária estudada.

$$R_{Efron}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (N_{observado_i} - N_{previsto_i})^2}{\sum_{i=1}^n (N_{observado_i} - N_{observado})^2} \quad (9)$$

Onde

$N_{observado_i}$ = Número total de acidentes ocorridos em cada elemento;

$N_{previsto}$ = Número previsto de acidentes em cada elemento;

$N_{observado}$ = Média dos acidentes em todos os elementos.

O MAD proporciona uma medida do desvio médio do modelo, expressando o erro em unidades absolutas (acidentes/ano). Um valor próximo de zero indica um bom ajuste do modelo, significando que, em média, a diferença entre a contagem prevista e a observada é mínima. Ele é calculado usando a seguinte Equação 10 (adaptada (GROSS; JOVANIS, 2007)):

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |N_{observado_i} - N_{previsto_i}|}{n} \quad (10)$$

Onde

$N_{observado}$ = Número total de acidentes ocorridos em cada elemento;

$N_{previsto}$ = Número previsto de acidentes em cada elemento;

n = Número total de elementos na amostra.

O MAPE calcula a média de todos os erros absolutos em termos percentuais, o que permite comparar o desempenho do modelo independentemente da magnitude do volume de tráfego. Ele é calculado a partir da seguinte Equação 11:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{N_{observado_i} - N_{previsto_i}}{N_{observado_i}} \right| \cdot 100 \quad (11)$$

Onde

$N_{observado}$ = Número total de acidentes ocorridos em cada elemento;

$N_{previsto}$ = Número previsto de acidentes em cada elemento;

n = Número total de elementos na amostra.

Onde os termos são os mesmos do MAD, e o resultado é apresentado em porcentagem. Um MAPE baixo indica que o erro de previsão, em termos relativos, é pequeno.

3.2.3 Método Empírico de Bayes

Após a calibração do modelo preditivo através do Fator C_x , o processo avança para o Método Empírico de Bayes (EB). O EB constitui a técnica mais adequada e recomendada pelo HSM para aprimorar a estimativa da frequência média de acidentes. Sua principal finalidade é compensar o viés da regressão à média, um fenômeno estatístico onde as flutuações naturais na contagem de acidentes poderiam ser incorretamente atribuídas a uma falha de projeto ou a uma contramedida. Ao combinar a previsão do modelo ($N_{previsto}$) com os dados reais de acidentes observados em um segmento, o EB gera o número esperado de acidentes ($N_{esperado}$), que é uma estimativa estatisticamente mais robusta e confiável.

Para sua aplicação, que pode abranger desde elementos viários individuais até um conjunto deles, o Manual exige um histórico mínimo de dois anos de acidentes, sob a condição de que as características geométricas e operacionais do trecho tenham sido mantidas.

A aplicação do método EB tem por resultado o número esperado de acidentes, $N_{esperado}$. No cálculo é utilizado o parâmetro de superdispersão (k), relacionado à cada equação de regressão das diferentes SPFs. Quanto menor for o valor do parâmetro k , maior a confiabilidade dos resultados do método.

O método EB é aplicado à cada trecho homogêneo, a partir das seguintes Equações 12 e 13 (AASHTO, 2010).

$$N_{esperado} = w \cdot N_{previsto} + (1 - w) \cdot N_{observado} \quad (12)$$

$$w = \frac{1}{1 + k \cdot N_{previsto}} \quad (13)$$

Onde

$N_{esperado}$ = 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 para o período de análise;

w = fator de ponderação referente à SPF;

k = parâmetro de superdispersão associado à SPF (Equação 5).

A compreensão desses procedimentos metodológicos estabelece a base necessária para a análise prática conduzida neste trabalho. Assim, no capítulo seguinte, apresenta-se o estudo de caso desenvolvido para o trecho selecionado da Serra do Mar, no qual o método EB é aplicado aos dados reais de acidentes, permitindo avaliar o desempenho operacional da rodovia e identificar potenciais pontos críticos.

4 ESTUDO DE CASO

A metodologia do modelo preditivo do HSM, detalhada no capítulo anterior, será aplicada para avaliar o desempenho em segurança viária de um trecho de elevada importância estratégica: a Serra do Mar. Essa aplicação prática é fundamental para avaliação da transferência do modelo internacional para um contexto com desafios geográficos e operacionais únicos.

Nesse sentido, compreender as características físicas do segmento analisado é fundamental para contextualizar os resultados obtidos. O trecho estudado da Serra do Mar é composto predominantemente por pista dupla, com duas faixas por sentido, separadas por barreira central. Seu traçado apresenta curvas de raio reduzido, declives acentuados e rampas longas, elementos típicos de regiões montanhosas, que demandam maior atenção dos condutores, sobretudo daqueles que operam veículos pesados.

Além da geometria, as condições operacionais e ambientais também influenciam significativamente a segurança viária ao longo do trecho. A pavimentação, de modo geral, encontra-se em bom estado, embora sujeita a desgastes decorrentes da elevada umidade e do tráfego intenso. A sinalização vertical e horizontal é presente, mas há segmentos em que a visibilidade é prejudicada pela neblina e pela vegetação densa nas margens (Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), 2015). Em alguns pontos críticos, observam-se obras de contenção e dispositivos de drenagem; entretanto, tais intervenções nem sempre são suficientes para mitigar riscos associados a deslizamentos de terra ou ao acúmulo de água na pista.

Predomina na região clima úmido subtropical, caracterizado por chuvas frequentes ao longo do ano e temperaturas amenas. Durante o inverno e início da primavera, é comum a ocorrência de neblina intensa e visibilidade reduzida, especialmente nas primeiras horas da manhã e à noite (CENACID, 2023). Tais fatores, combinados à alta umidade do solo, favorecem deslizamentos de encostas e instabilidade geotécnica, impactando diretamente o tráfego e a segurança. Essas condições ambientais adversas também afetam a aderência dos pneus ao pavimento, elevando a probabilidade de perda de controle veicular em curvas e declives.

O trecho da Serra do Mar apresenta um fluxo elevado de veículos, com predominância de caminhões e carretas que representam parcela significativa do tráfego total. Há ainda picos sazonais em períodos de férias e feriados, quando o fluxo de veículos leves com destino ao litoral cresce substancialmente. Esse aumento repentino na densidade do tráfego propicia congestionamentos e maior probabilidade de colisões traseiras, sobretudo em trechos com restrição de ultrapassagem.

4.1 ANÁLISE DOS DADOS

Considerando as particularidades geométricas e operacionais da Serra do Mar, caracterizada por trechos sinuosos, rampas acentuadas e elevada intensidade de tráfego, sobretudo de veículos pesados. Definiu-se como área de estudo um segmento de 37,62 km da BR-376, situado entre os quilômetros 644,50 e 682,12. Essa extensão corresponde à totalidade do trecho da serra.

A delimitação adotada fundamentou-se em três critérios principais, a disponibilidade dos dados de acidentes fornecidos pela concessionária Arteris, a concentração histórica de ocorrências registradas nos documentos encaminhados e as condições geométricas e ambientais que tornam essa seção especialmente suscetível à ocorrência de acidentes

Para a análise, foram utilizados dados referentes aos anos de 2023 e 2024, fornecidos pela concessionária Arteris, Litoral Sul. Ao longo desse período, observa-se uma tendência de aumento no número total de acidentes, possivelmente relacionada ao crescimento da circulação de veículos, à complexidade geométrica do trecho e às limitações estruturais típicas de áreas montanhosas.

Nos dois anos analisados, foram registrados 527 acidentes no trecho, dos quais 434 envolveram apenas danos materiais, 86 resultaram em vítimas e 7 evoluíram para óbito. Verifica-se que 17,6% das ocorrências envolveram vítimas, incluindo casos fatais, o que reforça a importância da identificação e do tratamento dos pontos críticos na região

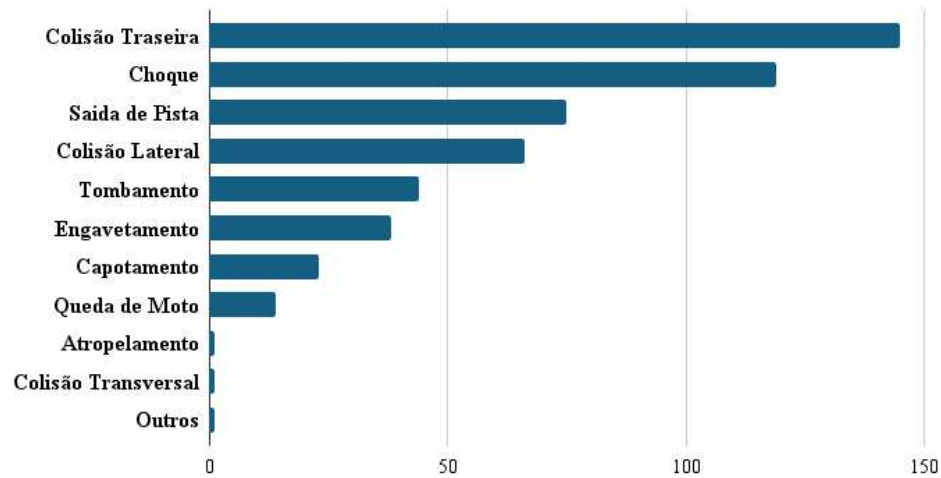
Na sequência, a Figura 4 apresentam-se as análises referentes à classificação dos acidentes segundo o tipo de ocorrência, permitindo identificar padrões relevantes para a compreensão da dinâmica dos eventos ao longo do trecho estudado.

Entre os tipos de acidentes registrados no período analisado, destaca-se que a colisão traseira foi a ocorrência mais frequente, totalizando 145 casos. Esse tipo de acidente é comum associado a problemas como variações bruscas de velocidade, trechos com congestionamento e falta de distância de segurança entre veículos.

Em seguida, os acidentes classificados como choque somaram 119 registros. Essa categoria abrange colisões contra qualquer objeto fixo ou móvel, incluindo árvores, defensas metálicas, barreiras, elementos de drenagem, taludes, objetos sobre a pista e suportes de sinalização.

A saída de pista, por sua vez, contabilizou 75 eventos. Esse tipo de acidente ocorre frequentemente em situações de perda de controle do veículo, podendo ser influenciado por fatores como excesso de velocidade, pavimento escorregadio e fadiga do motorista. Registraram-se também 66 casos de colisão lateral, geralmente associados a manobras de ultrapassagem mal avaliadas, desatenção, mudança inadequada de faixa ou insuficiência de espaço lateral.

Figura 4 – Tipos de Acidentes



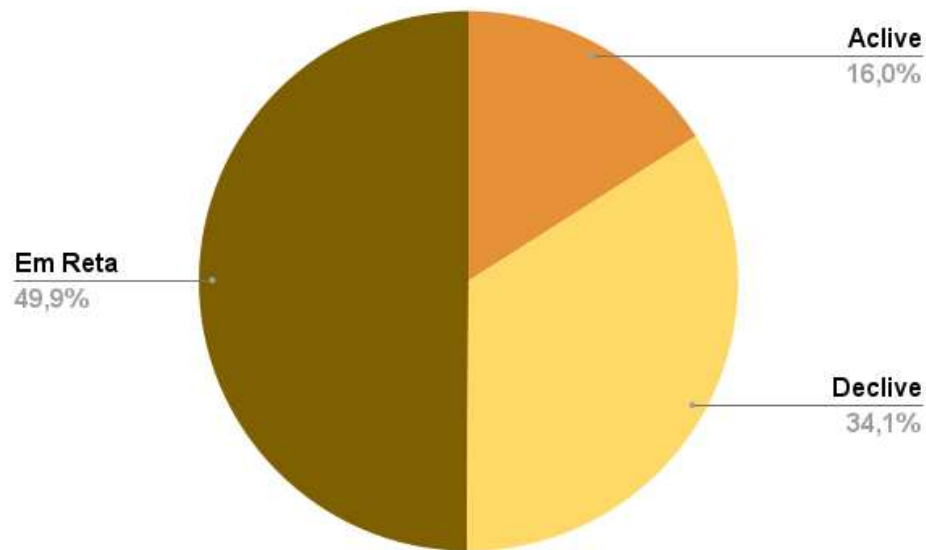
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A Figura 5 mostra a análise da distribuição dos acidentes em relação ao perfil longitudinal da via. Observa-se que 49,9% dos acidentes ocorreram em trechos de reta, indicando que, mesmo em segmentos teoricamente mais seguros, fatores como velocidade elevada, desatenção e variações repentinas de fluxo podem desempenhar papel significativo na ocorrência de colisões.

Os trechos em declive representam 34,1% dos acidentes, porcentagem significativa e compatível com as características da Serra do Mar. Declives aumentam o risco de perda de controle, especialmente para veículos pesados, devido à dificuldade de frenagem e à maior tendência de derrapagem em condições adversas.

Já os trechos em aclive responderam por 16% dos acidentes, valor inferior, mas ainda relevante. Em aclives, o risco pode estar associado à redução de velocidade, o esforço do motor e as diferenças de desempenho entre veículos podem gerar situações de risco, como colisões traseiras e necessidade de ultrapassagens.

Figura 5 – Perfil da Pista

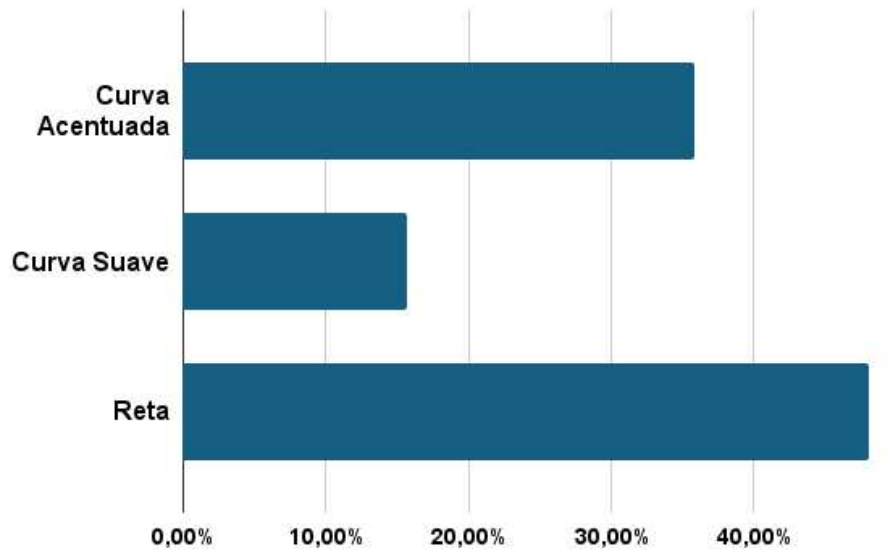


Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A Figura 6 mostra a análise de distribuição dos acidentes em relação ao traçado horizontal da via, que mostra 48% das ocorrências acontecerem em trechos de reta. Esse resultado indica que, mesmo em segmentos considerados mais simples do ponto de vista geométrico, fatores como velocidade elevada e desatenção continuam contribuindo significativamente para a ocorrência de acidentes.

Por outro lado, 35,86% dos acidentes ocorreram em curvas acentuadas, o que reforça a influência da geometria mais restritiva sobre a segurança viária. Curvas de raio reduzido exigem maior habilidade de condução, reduções de velocidade e atenção constante. Já as curvas suaves representaram 15,75% dos acidentes, proporção menor, mas ainda significativa. Embora apresentem menor complexidade geométrica, essas curvas podem induzir a uma menor percepção de risco por parte do condutor, favorecendo velocidades inadequadas e dificultando manobras evasivas em situações inesperadas.

Figura 6 – Traçado da Pista

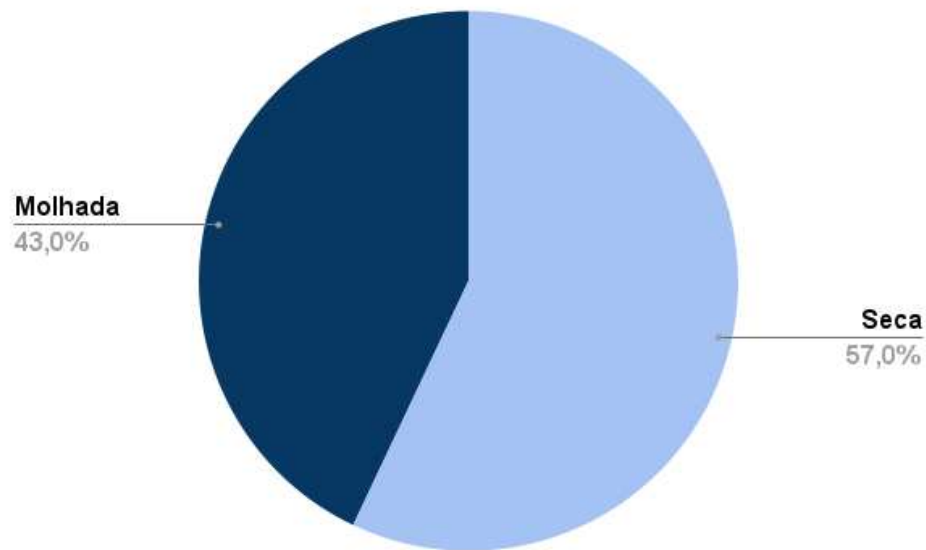


Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A distribuição dos acidentes de acordo com a condição da pista, apresentada na Figura 7, indica que 57,0% das ocorrências aconteceram em pista seca. Apesar disso, chama atenção a elevada proporção de acidentes em pista molhada, que corresponde a 43,0% dos registros, valor significativamente superior ao tempo efetivo em que o trecho permanece sob chuva.

Essa concentração de acidentes em condições de umidade sugere possíveis deficiências relacionadas à aderência do pavimento ou à eficiência da drenagem superficial, fatores que podem intensificar o risco de perda de controle do veículo. Além disso, o comportamento inadequado dos condutores em pista molhada, como manutenção de velocidade elevada ou frenagens bruscas, pode amplificar ainda mais esse risco.

Figura 7 – Condição da Pista



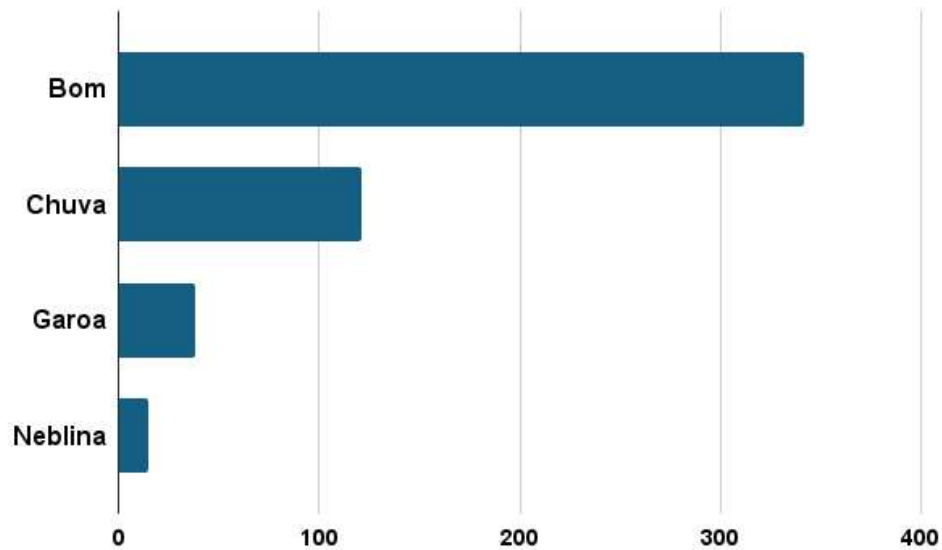
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A análise das condições de tempo no momento dos acidentes, apresentada na Figura 8, mostra que a maior parte das ocorrências aconteceu em Tempo Bom, totalizando 342 registros. Esse resultado indica que a acidentalidade no trecho está mais fortemente relacionada à geometria da via e ao comportamento dos condutores do que a fatores meteorológicos adversos.

Ainda assim, os acidentes ocorridos em condições de Chuva, que somam cerca de 121 registros, representam o segundo maior volume. Quando comparada à frequência real de precipitação no período estudado, essa quantidade reforça o risco significativamente maior associado à pista molhada, já evidenciado em análises anteriores. A menor aderência, o aumento da distância de frenagem e a maior dificuldade de controle do veículo contribuem para essa desproporção.

Por fim, os registros em situações de Garoa e Neblina, embora menos numerosos, são relevantes por refletirem problemas típicos da Serra do Mar, como redução de visibilidade e formação de áreas úmidas na pista. Esses resultados destacam a importância de avaliar a eficiência da sinalização, dos alertas de segurança e das estratégias de comunicação ao motorista em condições climáticas desfavoráveis.

Figura 8 – Condição de Tempo



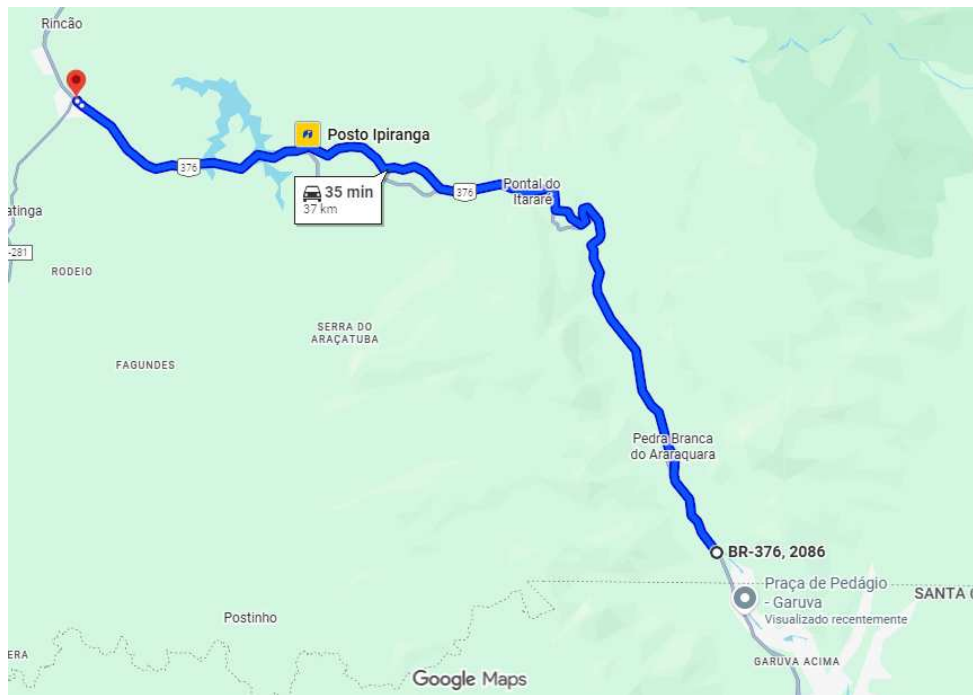
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS

Conforme a metodologia descrita no Capítulo 3, nesta seção foi realizada a identificação dos pontos críticos com base na taxa de severidade, indicador que considera simultaneamente o número de ocorrências, o volume de tráfego e a gravidade dos acidentes registrados ao longo do trecho analisado.

Para essa aplicação, utilizaram-se os volumes de tráfego fornecidos pela concessionária Arteris Litoral Sul, sendo a análise conduzida apenas em segmentos homogêneos em relação ao volume veicular. Foram definidos quatro segmentos para avaliação, o primeiro compreende o km 662 ao km 664; o segundo, do km 664 ao km 666; o terceiro, do km 666 ao km 669; e o quarto do km 669 ao km 671.

Figura 9 – Extensão analisada



Fonte: Google Maps (2025)

A Tabela 6 apresenta a aplicação da metodologia utilizada para o cálculo da taxa de severidade. Inicialmente, foi determinada a Unidade Padrão de Severidade (UPS), a qual atribui pesos diferenciados aos tipos de acidentes sem vítimas, com vítimas e com vítimas fatais. Com base na UPS e considerando o volume de tráfego, foi então obtida a taxa de severidade utilizada na identificação dos pontos críticos.

Tabela 6 – Pontos Críticos

KM	VDMA	Extensão	Danos Materiais	Vítimas	Vítimas fatais	UPS	T
662-664	37.332	2	29	4	0	49	1,80
664-666	37.332	2	122	18	2	238	8,73
666-669	37.332	3	172	40	4	424	10,37
669-671	37.332	2	111	25	1	249	9,14

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

No trecho entre o km 662 e o km 664, foram registrados 33 acidentes ao longo dos dois anos analisados. Dentre essas ocorrências, destacam-se 12 colisões traseiras e 7 colisões laterais, evidenciando que boa parte dos sinistros envolveu manobras de interação entre veículos. Além disso, 29 acidentes resultaram apenas em danos materiais, o que indica predominância de ocorrências de menor gravidade.

Quanto às condições operacionais, 20 acidentes ocorreram com a pista seca, e 21 foram registrados em situações de clima bom, sugerindo que fatores ambientais não

desempenharam papel determinante na maioria dos casos. A geometria viária também se mostrou relevante, 24 acidentes ocorreram em trechos em reta e 24 em segmentos em nível, apontando para possíveis associações com velocidade, atenção do condutor e fluidez do tráfego.

No conjunto de dados analisado do trecho km 664 ao km 666 (Figura 10), foram registrados 142 acidentes, englobando diferentes tipologias e condições operacionais. Desses eventos, 38 foram classificados como choques e 35 como colisões traseiras, enquanto 28 envolveram saída de pista. Observa-se ainda que 122 ocorrências resultaram apenas em danos materiais, ao passo que 18 envolveram vítimas, demonstrando que, embora frequentes, a maior parte dos acidentes apresentou menor severidade.

Em relação às condições ambientais e da via, 76 acidentes ocorreram com a pista molhada e 79 sob clima bom, revelando que os sinistros se distribuíram tanto em situações adversas quanto favoráveis. A geometria do trecho também mostrou influência significativa, 55 acidentes foram registrados em curva acentuada, enquanto 58 ocorreram em segmentos em reta. Quanto ao relevo, 68 acidentes aconteceram em trechos em nível e 51 em declive, sugerindo que variações altimétricas podem estar associadas a maior propensão a incidentes.

Figura 10 – KM665



Fonte: Google Earth (2025)

No trecho compreendido entre o km 666 e o km 669 (Figura 11), foram registradas ocorrências que evidenciam um padrão significativo de risco. Ao todo foram 216 acidentes, contabilizaram-se 172 acidentes com danos materiais e 40 acidentes com vítimas, demonstrando que, embora a maior parte dos eventos não tenha resultado em lesões, a severidade ainda é relevante.

Quanto aos tipos de acidentes, observou-se predominância de 55 choques, seguidos por 41 colisões traseiras e 27 colisões laterais. As características físicas da via também se destacam na distribuição dos acidentes. Do total, 108 ocorreram em curva acentuada e 32 em curva suave, indicando que mais de 80% dos registros estão associados a trechos curvos, o que reforça o potencial de criticidade desse segmento. Em relação ao relevo, 99 acidentes aconteceram em trechos em nível e 41 em aclive.

As condições ambientais mostraram que 87 acidentes ocorreram com a pista molhada, enquanto 144 foram registrados sob clima bom. Esse contraste evidencia que, mesmo em condições climáticas favoráveis, o traçado do trecho permanece como fator relevante para a ocorrência de sinistros.

Figura 11 – KM668



Fonte: Google Earth (2025)

No trecho compreendido entre o km 669 e o km 671 (Figura 12), foram registrados 137 acidentes ao longo do período analisado. Desse total, 111 envolveram apenas danos materiais, enquanto 25 resultaram em vítimas, demonstrando que, embora a maioria dos eventos não tenha gerado lesões, a severidade ainda é significativa.

Quanto à tipologia dos acidentes, observa-se predominância de 57 colisões traseiras, seguidas por 21 choques e 21 colisões laterais, indicando um padrão compatível com trechos onde há variação de velocidade, tráfego denso ou limitações de visibilidade.

A análise das características físicas da via revela que 71 acidentes ocorreram em trechos em nível e 48 em trechos de declive. Além disso, a maior parte dos acidentes (95 registros) aconteceu em segmentos retos, enquanto 23 ocorreram em curvas acentuadas, dado que reforça a influência do traçado na dinâmica dos acidentes.

Em relação às condições ambientais, 86 acidentes foram registrados com a pista seca e 27 sob chuva. Apesar disso, 98 ocorrências aconteceram em condições de clima bom, evidenciando que, mesmo em cenários favoráveis, o trecho apresenta elementos geométricos ou operacionais que contribuem para o elevado número de acidentes.

Figura 12 – KM669



Fonte: Google Earth (2025)

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO PREDITIVO

Nesta seção, aplica-se o método preditivo do Highway Safety Manual (HSM), conforme descrito na Seção 3.2, utilizando os dados coletados da rodovia BR-376 no trecho correspondente à Serra do Mar. O objetivo é estimar o número esperado de acidentes para o segmento estudado, levando em consideração suas características geométricas, operacionais e ambientais.

Conforme previsto nas Etapas 1 e 2 da metodologia, o trecho analisado abrange 9 km da BR-376, delimitados por segmentos específicos da Serra do Mar. O período de análise corresponde aos anos de 2023 e 2024, para os quais há registros consolidados de acidentes fornecidos pela concessionária responsável.

A rodovia é classificada como uma via rural de pista dupla com canteiro central, definição que determina os parâmetros e as Safety Performance Functions (SPF) aplicáveis ao modelo preditivo.

O Volume Médio Diário Anual (VMDA) calculado para o trecho foi de 37.332 veículos/dia, valor que evidencia um fluxo elevado e característico de corredores rodoviários estratégicos para o transporte de carga e passageiros.

Seguindo as orientações das Etapas 4 e 5 da metodologia, o segmento foi dividido em Trechos Homogêneos (TH), definidos como porções da rodovia que apresentam uniformidade em suas características físicas e operacionais. A Tabela 7 apresenta a divisão adotada e serviu de base para a aplicação detalhada do método preditivo.

Tabela 7 – Divisão em trechos homogêneos da BR-376

Trechos homogêneos	Início	Fim	Extensão (km)
1	662	664	2
2	664	666	2
3	666	669	3
4	669	671	2
Total			9km

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

No Trecho 1, entre os quilômetros 662 e 664, a rodovia apresenta faixas de rolamento de 3,5 m, acostamento de 2,5 m e canteiro central de 4,5 m. O segmento é totalmente equipado com iluminação pública, fiscalização eletrônica e o VDMA é de 37.332 veículos/dia.

No Trecho 2, entre os quilômetros 664 e 666, observa-se um leve aumento na largura das faixas de rolamento, que passam a 3,6 m e o acostamento de 3m. O canteiro central mantém-se em 4,5 m. Assim como no trecho anterior, há presença de iluminação pública e fiscalização eletrônica. O VDMA permanece em 37.332 veículos/dia.

No Trecho 3, do quilômetro 666 ao 669, encontra-se a maior largura de canteiro central, atingindo 5,8 m. As faixas de rolamento mantêm largura de 3,6 m, enquanto o acostamento se amplia para 3 m. A iluminação pública e a fiscalização eletrônica continuam presentes e com VDMA de 37.332

Por fim, o Trecho 4, entre os quilômetros 669 e 671, apresenta novamente faixas de 3,5 m, semelhante ao Trecho 1, e acostamento de 3 m. O canteiro central reduz-se para 3,5 m, tornando-se o menor entre os segmentos analisados. Ainda assim, o trecho mantém iluminação pública, fiscalização eletrônica e o mesmo VDMA de 37.332 veículos/dia.

Após a aplicação do modelo preditivo, da calibração local, do método Empírico de Bayes e dos respectivos fatores de ajuste, obteve-se o número de acidentes previstos apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado dos modelos preditivos

Trechos	662-664	664-666	666-669	669-671	Trecho total
N_{obs}	16	71	108	68	263
N_{prev}	8	8	13	8	160
C_r	1,89	8,92	8,46	8,03	1,64
N_{prev} (Calibrado)	16	71	108	68	263
N_{esp} (Método EB)	12,91	44,29	69,20	43,67	221,02

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A Tabela 8 apresenta uma comparação direta entre o número de acidentes observados na BR-376 e as estimativas geradas pelos diferentes modelos aplicados: o modelo original do HSM, a versão calibrada por fatores locais e o Modelo Esperado obtido pelo Método Empírico de Bayes (EB). Os resultados evidenciam que o modelo base subestima a acidentalidade em todos os trechos analisados, refletindo limitações importantes das Safety Performance Functions (SPFs) originais. Essa discrepância decorre, das particularidades operacionais e geométricas da Serra do Mar, que não são capturadas pelos parâmetros definidos no manual.

Essa limitação está associada ao fato de que o HSM foi desenvolvido com base em bancos de dados norte-americanos, inseridos em um contexto distinto da realidade brasileira no que diz respeito à infraestrutura rodoviária, ao comportamento dos motoristas, à composição da frota e às condições ambientais. Quando o modelo é aplicado diretamente, sem qualquer ajuste local, tende a subestimar a frequência real de acidentes, como trechos sinuosos de serra e com intensa circulação de veículos pesados. Trata-se de fatores que aumentam o risco operacional, mas que não estão adequadamente representados nos coeficientes originais do HSM.

Essa limitação explica a diferença observada entre as estimativas e os valores reais, que chega a 39,2% no total de acidentes, além de discrepâncias nos trechos mais críticos. Para corrigir essa incompatibilidade estrutural entre o modelo e o contexto local, emprega-se a calibração por fatores C_r . Os valores encontrados, variando de 1,89 a 8,92, evidenciam não apenas o grau de subestimação das SPFs originais, mas também a acentuada heterogeneidade operacional ao longo da serra, já que trechos com maior complexidade geométrica e maior concentração de acidentes requerem fatores de correção mais elevados.

Ainda que a calibração permita ao modelo reproduzir exatamente o número de acidentes observados, o que é esperado, dado que o ajuste é baseado diretamente na série histórica, essa correção atua apenas no nível médio de acidentalidade. Em outras palavras, a calibração melhora a aderência retrospectiva, mas não amplia a capacidade preditiva prospectiva, pois a estrutura funcional das SPFs permanece essencialmente a mesma, limitando sua aplicabilidade a contextos futuros ou distintos do período analisado.

Nesse cenário, o Método Empírico de Bayes (EB) diferentemente da calibração direta, combina, de forma estatisticamente ponderada, as estimativas produzidas pelo modelo base do HSM com os dados observados no trecho. Essa integração equilibra as limitações de cada fonte de informação: o modelo base tende a subestimar a acidentalidade por não incorporar devidamente as condições locais, enquanto os valores observados podem refletir flutuações anuais, surtos eventuais de acidentes ou variações atípicas.

O número esperado de acidentes é obtido por meio de um mecanismo de

ponderação dependente da variabilidade estatística do trecho, representada pelo parâmetro de superdispersão k . Esse processo, conhecido como shrinkage, impede que valores extremos ou anos atípicos influenciem excessivamente as estimativas.

Como resultado, as previsões do EB tendem a situar-se entre o modelo base e o modelo calibrado, oferecendo um equilíbrio mais realista entre teoria e observação. No caso da BR-376, o método estimou 221 acidentes para o período, valor superior ao previsto pelo HSM original, mas inferior ao total observado utilizado na calibração, evitando tanto a subestimação acentuada quanto a superdependência dos dados locais.

Tabela 9 – Qualidade de ajuste

	Modelo Calibrado	Modelo Calibrado + Método EB
C_r 1,64		
R_{Efron}^2	0,79	0,22
MAD	56,5	26,46
$MAPE$	21,48	10,06

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A Tabela 9 evidencia que, embora o modelo calibrado apresente um coeficiente de determinação elevado ($R_{Efron} = 0,79$), esse desempenho ocorre porque o ajuste foi realizado diretamente sobre os valores observados. Assim, o modelo torna-se sensível às variações específicas do histórico recente, incluindo anos atípicos ou concentrações anormais de acidentes, o que explica os erros ainda elevados ($MAD = 56,5$; $MAPE = 21,48\%$). Assim, a calibração melhora a aderência aos dados passados, mas não necessariamente sua capacidade preditiva para cenários futuros.

Ao incorporar o Método Empírico de Bayes (EB), observa-se uma redução no erro absoluto médio (MAD) e no erro percentual ($MAPE$), que caem aproximadamente pela metade. Essa melhoria ocorre porque o EB suaviza as flutuações do histórico, combinando a tendência geral do modelo com o comportamento observado no trecho. Essa abordagem resulta em previsões menos voláteis e mais representativas da condição média esperada da rodovia.

A redução do R_{Efron} para 0,22 no modelo EB não indica pior desempenho, mas sim uma consequência natural da filosofia bayesiana: em vez de buscar reproduzir com precisão o passado, o método prioriza estabilidade estatística e evita sobreajuste. Assim, o modelo EB apresenta uma capacidade preditiva mais adequada porque não depende de variações específicas do período analisado.

Em conjunto, os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9 demonstram que o HSM, em sua formulação original, não representa adequadamente as particularidades do contexto brasileiro analisado. Além disso, a própria base de dados empregada, a um trecho de aproximadamente 9 km e a apenas dois anos de registros, impõe limitações

à capacidade de generalização dos modelos, ampliando a influência de flutuações anuais, concentrações pontuais de acidentes e variações atípicas.

Embora a calibração aumente a aderência do modelo às séries observadas, seu desempenho permanece condicionado às características específicas e à curta extensão temporal dos dados disponíveis, o que reduz sua confiabilidade para projeções. Neste cenário, o Método Empírico-Bayes demonstra maior consistência ao reduzir a volatilidade do histórico e integrar a tendência geral do modelo ao comportamento específico do trecho.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3 aos dados da BR-376, no trecho da Serra do Mar. O objetivo é avaliar o desempenho dos modelos preditivos, caracterizar os principais pontos críticos e identificar fatores associados à acidentalidade, de modo a subsidiar recomendações de engenharia de tráfego.

Conforme apresentado na Tabela 6, os trechos entre os quilômetros 664–666, 666–669 e 669–671 apresentaram as maiores taxas de severidade ($T = 8,73$; $10,37$; e $9,14$, respectivamente), superando de forma expressiva o primeiro segmento ($T = 1,80$).

O trecho 666–669 foi o mais crítico, totalizando 216 acidentes e quatro fatalidades. Mais de 60% dos sinistros ocorreram em curvas (acentuadas ou suaves), reforçando a influência da geometria horizontal. O tráfego intenso e a elevada participação de veículos pesados amplificam o risco nesse segmento.

Por fim, o trecho 669–671 registrou 137 acidentes, com predominância de colisões traseiras (41,6%) e eventos concentrados em segmentos retilíneos. As condições majoritariamente favoráveis no momento dos acidentes reforçam a hipótese de problemas operacionais, como variações de velocidade, distâncias de seguimento inadequadas e possível insuficiência de sinalização.

De forma geral, os resultados evidenciam que os principais fatores associados à acidentalidade incluem geometria horizontal adversa, presença de declives, elevada participação de veículos pesados e condições operacionais, com menor contribuição das condições ambientais. Esses achados orientam, nos tópicos seguintes, as propostas de intervenções de engenharia e a avaliação dos métodos preditivos utilizados.

5.1 PROPOSTAS DE MEDIDAS E MELHORIAS

Com base na caracterização dos pontos críticos e nos fatores que influenciam a acidentalidade, foram definidas medidas de engenharia organizadas por trecho e prioridade, alinhadas ao Highway Safety Manual (AASHTO, 2010) e às práticas recomendadas para rodovias de montanha.

O trecho km 662–664 embora seja o segmento menos crítico, a predominância de colisões traseiras e laterais exige intervenções operacionais. Recomenda-se reforçar sinalização horizontal, instalar painéis de mensagens variáveis e adotar fiscalização por velocidade média. Também são indicadas ações de monitoramento por câmeras e maior controle de veículos pesados.

O trecho km 664–666, com maior severidade e presença de fatalidades, este trecho demanda medidas estruturais. São recomendadas correções geométricas (ajuste de raios de curva e superelevação), melhoria das defensas, instalação de atenuadores de impacto e intervenções para pista molhada, como HFST, grooving e aprimoramento da drenagem. A sinalização deve ser intensificada, especialmente em curvas e em condições adversas.

Sendo o trecho mais crítico, o km 666-669, necessita de um programa de requalificação abrangente. Destacam-se readequações geométricas completas, superlargura de curvas, faixas de escape e terceira faixa para veículos lentos. Recomenda-se ainda um sistema ITS robusto (monitoramento, detecção automática de incidentes e estações meteorológicas), além de melhorias de contenção, pavimento e sinalização avançada.

No trecho km 669–671, a predominância de colisões traseiras em trechos retos requer medidas voltadas à fluidez e atenção do condutor. Sugere-se controle rigoroso de velocidade, quebra de monotonia visual, instalação de bandas sonoras e gestão específica do tráfego de caminhões, incluindo balança dinâmica e áreas de inspeção. Também são recomendadas baías de emergência, telefones SOS e iluminação contínua.

5.2 ANÁLISE DOS METODOS

Esta seção apresenta uma síntese do desempenho dos modelos preditivos aplicados à BR-376, considerando o modelo base do Highway Safety Manual (HSM), sua versão calibrada e o refinamento obtido com o Método Empírico-Bayes (EB).

A análise dos resultados obtidos a partir dos dados fornecidos pela Arteris mostrou que o modelo original do Highway Safety Manual (HSM) não é capaz de representar adequadamente a acidentalidade observada na Serra do Mar. Enquanto os registros reais contabilizaram 263 acidentes ao longo do trecho estudado, o HSM previu apenas 160, resultando em uma subestimação de 39,2%. Essa diferença significativa ocorre porque os dados da Arteris revelam uma rodovia com características geométricas e operacionais muito mais severas do que aquelas consideradas na formulação das Safety Performance Functions (SPFs) norte-americanas.

A grande presença de curvas horizontais acentuadas, declividades elevadas, tráfego intenso de veículos pesados, frequência de neblina e pavimento constantemente úmido produz uma variabilidade de acidentes muito maior do que a prevista pelo modelo original. Como essas condições não são suficientemente contempladas no HSM, o resultado é uma expressiva divergência entre valores observados e previstos.

A etapa seguinte consistiu na calibração do modelo, que ajustou as previsões por meio de fatores de correção (C_r) variando entre 1,89 e 8,92, refletindo a

heterogeneidade operacional captada nos dados reais da Arteris. Esses valores elevados evidenciam que o comportamento dos acidentes na Serra do Mar é substancialmente mais intenso do que o admitido pelo HSM em sua forma original. Apesar de a calibração permitir que o modelo reproduza exatamente o número total de acidentes observados, o desempenho estatístico ainda apresentou limitações importantes.

O Desvio Médio Absoluto (MAD) permaneceu alto, em 56,5, e o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) alcançou 21,48%, enquanto o R_{Efron}^2 foi de 0,79. Esses resultados refletem a grande dispersão dos acidentes ao longo dos trechos e a incapacidade do modelo de capturar integralmente os picos de acidentalidade revelados nos dados da Arteris, sobretudo em trechos com geometria extremamente agressiva.

A aplicação do Método Empírico-Bayes (EB) trouxe melhorias substanciais, ao combinar a previsão calibrada do HSM com a experiência histórica registrada pela Arteris. Essa abordagem reduz a influência de valores extremos e suaviza variações abruptas, o que se reflete na redução expressiva dos erros estatísticos: o MAD caiu de 56,5 para 26,46 e o MAPE reduziu-se de 21,48% para 10,06%. O total estimado pelo EB, de 221 acidentes, situou-se entre o valor previsto pelo HSM calibrado e o observado na base real, configurando um comportamento mais coerente com a variabilidade característica da Serra do Mar.

A queda do R_{Efron}^2 para 0,22, embora à primeira vista pareça indicar pior desempenho, é uma consequência natural da suavização promovida pelo EB, que reduz a variabilidade entre trechos e, portanto, diminui a proporção de variância explicada pelo modelo. Trata-se de um comportamento esperado e compatível com o propósito metodológico do EB, que visa produzir estimativas mais estáveis e confiáveis para planejamento.

Quanto aos AMFs utilizados, largura de faixa, acostamento, canteiro central, iluminação e fiscalização, verificou-se que seu efeito é limitado. Os dados da Arteris revelam que os principais condicionantes da acidentalidade estão relacionados a fatores geométricos e climáticos específicos da Serra do Mar, como raios horizontais reduzidos, declividades elevadas, neblina recorrente, pavimento molhado e grande fluxo de veículos pesados. Como esses aspectos não são plenamente contemplados pelos AMFs do HSM, o modelo tende a subestimar a acidentalidade, reforçando a necessidade de futuros AMFs adaptados ao contexto brasileiro.

Por fim, destacam-se limitações importantes: o curto período disponível para calibração de apenas dois anos, o número reduzido de trechos homogêneos, a alta variabilidade interna dos segmentos, a falta de AMFs específicos para realidades nacionais, a não consideração de sazonalidade e a ausência de avaliação externa com dados futuros. Esses pontos devem ser considerados tanto na interpretação dos resultados quanto ao desenvolvimento de estudos complementares.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a segurança viária e identificar pontos críticos de acidentes ao longo de um segmento de 9 km da BR-376, localizado na Serra do Mar, entre os quilômetros 662 e 671. Para isso, foram aplicadas metodologias baseadas no *Highway Safety Manual* (HSM) e nas diretrizes do DNIT (2021), contemplando a estimativa do número médio anual de acidentes e o uso de indicadores como a Taxa de Acidentes (TA) e a Taxa de Severidade (TS).

A aplicação do modelo preditivo do HSM em sua forma original evidenciou uma expressiva subestimação do número real de acidentes na Serra do Mar. Esse resultado é particularmente relevante, pois mostra que as Safety Performance Functions (SPFs), desenvolvidas para a realidade norte-americana, não conseguem representar de maneira adequada as condições geométricas, climáticas e operacionais desse trecho brasileiro, marcado por aclives, curvas fechadas, alta umidade e intenso fluxo de veículos pesados.

A partir dessa constatação, a análise avançou para a identificação dos pontos críticos ao longo da rodovia. A Taxa de Severidade indicou que os segmentos compreendidos entre os quilômetros 664–666, 666–669 e 669–671 apresentam os maiores níveis de risco, sendo o trecho 666–669 o mais crítico. Esse segmento se destaca pela concentração de acidentes em curvas acentuadas e pela forte influência do tráfego pesado, fatores que elevam significativamente a probabilidade de perdas de controle e colisões.

No que se refere ao desempenho dos métodos de previsão, o Empírico de Bayes (EB) em combinação com a calibração local promoveu uma redução substancial dos erros estatísticos: o Desvio Médio Absoluto (MAD) caiu de 56,5 para 26,46 acidentes e o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) reduziu-se de 21,48% para 10,06%. Esses resultados reforçam o papel do EB como ferramenta essencial para produzir estimativas mais estáveis, coerentes e adequadas ao uso em planejamento e tomada de decisão.

Destaca-se a importância da etapa de calibração. Os valores do Fator de Calibração (C_x), que variaram entre 1,89 e 8,92 ao longo dos trechos, revelam a grande heterogeneidade operacional do corredor analisado. Esses valores demonstram a necessidade incontornável de ajustar modelos internacionais às especificidades brasileiras, garantindo previsões mais realistas e compatíveis com o comportamento de acidentes nas rodovias nacionais.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que a acidentalidade registrada na BR-376 não é fruto de eventos aleatórios, mas sim da interação entre condições

geométricas severas, operação complexa e alto volume de veículos pesados, elementos que os modelos internacionais, quando aplicados sem adaptação, não conseguem representar adequadamente. A subestimação observada no HSM original, os elevados fatores de calibração e a melhora proporcionada pelo Empírico de Bayes mostram que a realidade operacional da Serra do Mar exige abordagens preditivas sensíveis às suas particularidades.

A convergência entre os dados da Arteris e os resultados do modelo calibrado reforça que metodologias preditivas, quando ajustadas ao contexto local, são capazes de fornecer diagnósticos confiáveis e subsidiar intervenções de engenharia direcionadas. Assim, o estudo não apenas identificou os segmentos mais críticos, mas também mostrou que a combinação entre calibração e EB constitui um caminho metodológico eficaz para avaliar e priorizar melhorias de segurança viária em rodovias brasileiras de alta complexidade.

Dessa forma, os achados desta pesquisa contribuem para o aperfeiçoamento das práticas de análise de risco no Brasil, evidenciam a necessidade de modelos adaptados à realidade nacional e oferecem uma base técnica para orientar decisões futuras, tanto na BR-376 quanto em outros corredores logísticos com características semelhantes.

Para a continuidade dos estudos e o aprimoramento da modelagem no contexto nacional, sugerem-se:

- Ampliar a base de dados para incluir mais anos de registro de acidentes;
- Aplicar o modelo em outros trechos da BR-376 e em rodovias com características diferentes;
- Utilizar ferramentas de geoprocessamento (SIG) para análises espaciais mais detalhadas;
- Testar modelos estatísticos e de aprendizado de máquina para aprimorar as previsões;
- Avaliar os efeitos das medidas corretivas após sua implementação nos pontos críticos.

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **Highway Safety Manual**. Washington, D.C., 2010. (Highway Safety Manual).
- Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). **Avaliações de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea instrumentada**. [S.l.], 2015.
- Arteris S.A. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. [S.l.], 2023.
- Autoridade Portuária de Itajaí. **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Itajaí**. [S.l.], 2019.
- AZARI, M. et al. A gis-based approach for accident hotspots mapping in mountain roads using seasonal and geometric indicators. **Applied geomatics**, Springer, v. 15, n. 1, p. 127–139, 2023.
- CARDOSO, G. **Modelos para previsão de acidentes de trânsito em vias arteriais urbanas**. — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- CENACID. **Relatório preliminar dos deslizamentos nas rodovias da Serra do Mar no Leste do Estado do Paraná**. 2023. Acesso em: 21 out. 2025. Disponível em: <https://cenacid.ufpr.br/noticia/cenacid-apresentou-o-relatorio-preliminar-dos-deslizamentos-nas-rodovias-da-serra-do-mar/>.
- Comissão Europeia. **Road safety statistics in the EU**. 2025. Disponível em: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/road-safety-statistics-2024-progress-continues-amid-persistent-challenges-2025-10-17_en.
- Confederação Nacional do Transporte. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas 2022**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/File/PrincipaisDados.pdf>.
- D'AGOSTINO, C. Investigating transferability and goodness of fit of two different approaches of segmentation and model form for estimating safety performance of motorways. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 84, p. 613–623, 2014.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Relatório de Gestão, 2021**. [S.l.], 2021.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). **Manual de identificação, análise e tratamento de pontos negros**. Brasília, 1987.
- DINGUS, T. A. et al. **The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment**. 3500 Transportation Research Plaza (0536), Blacksburg, Virginia 24061, 2006.
- DOMENCICH, T. A.; MCFADDEN, D. **Urban travel demand: A behavioral analysis**. [S.l.]: North-Holland, 1975.

- ECK, R. W.; FRENCH, L. J. **Effective Superelevation for Large Trucks on Sharp Curves and Steep Grades**. Morgantown, WV, 2002.
- ELVIK, R. **The Handbook of Road Safety Measures**. Bingley, UK: Emerald Group Publishing, 2009.
- ELYASSAMI, S.; HAMID, Y.; HABUZA, T. Road crashes analysis and prediction using gradient boosted and random forest trees. In: IEEE. **2020 6th IEEE Congress on Information Science and Technology (CiSt)**. [S.l.], 2021. p. 520–525.
- EL FAOUZI, N.-E. et al. Effects of adverse weather on traffic and safety: State-of-the-art and a european initiative. In: **SIRWEC 2010: 15th International Road Weather Conference**. Blacksburg, VA: [s.n.].
- Federal Highway Administration (FHWA). **Systemic Safety Project Selection Tool**. [S.l.], 2013.
- GROSS, F.; JOVANIS, P. P. Estimating safety effectiveness of shoulder width changes with case-control and cohort methods. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2019, n. 1, p. 237–245, 2007.
- HARDIN, J. W.; HILBE, J. M. **Generalized Linear Models and Extensions**. 2. ed. Texas: Stata Press, 2007.
- HAUER, E. An application of the likelihood/bayes approach to the estimation of safety countermeasure effectiveness. **Accident Analysis & Prevention**, Elsevier, v. 15, n. 4, p. 287–298, 1983.
- HAUER, E. **Observational before-after studies in road safety: estimating the effect of highway safety measures**. Oxford, UK: Pergamon, 1997.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Custos dos acidentes de trânsito no Brasil: Estimativa simplificada com base na atualização das pesquisas do IPEA sobre custos de acidentes nos aglomerados urbanos e rodovias**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/696b6af9-01ce-423a-9b1d-bc07c016ca6e/content>.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Balço da 1 década de ação pela segurança no trânsito no Brasil e perspectivas para a 2 década**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstreams/696b6af9-01ce-423a-9b1d-bc07c016ca6e/download>.
- IPEA. **Impactos Sociais e Econômicos dos Acidentes de Trânsito nas Rodovias Brasileiras**. Brasília: IPEA, 2006. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>.
- LEE, S. Y. et al. Characteristics of traffic accidents on highways: An analysis based on patients treated at a regional trauma center. **Journal of Trauma and Injury**, v. 34, n. 4, p. 263–269, 2021.
- OECD; ITF. **The Safe System Approach: A Framework for Road Safety**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://safesystemtool.itf-oecd.org/en/framework>.
- OMS. **Global status report on road safety 2021**. Geneva, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>.

ONU. **Plano Global - Década de Ação pela segurança no trânsito 2021–2030**. Geneva, 2021. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/documentos/plano-global-decada-acao-pela-seguranca-no-transito-2021-2030>.

PEDEN, M. et al. (Ed.). **World report on road traffic injury prevention**. Geneva: [s.n.], 2004. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9241562609>.

Polícia Rodoviária Federal. **Relatório Anual de Acidentes de Trânsito 2022**. [S.l.], 2023. Disponível em: https://www.gov.br/prf/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/diest-arquivos/anuario-2022_final.html.

SACCHI, E.; PERSAUD, B.; BASSANI, M. Assessing international transferability of the highway safety manual crash prediction algorithm and its components. **Transportation Research Record**, Transportation Research Board, Washington, DC, n. 2279, p. 90–98, 2012.

SHINAR, D. **Traffic safety and human behavior**. London: Academic Press, 2017.

SILVA, P. B.; ANDRADE, M.; FERREIRA, S. Machine learning applied to road safety modeling: a systematic literature review. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 7, n. 6, p. 775–790, 2020.

WEGMAN, F. The Future of Road Safety: An International Perspective. **Transportation Research Procedia**, v. 25, p. 4118–4128, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2016.05.003>.

ZHANG, H. et al. Formulating a gis-based geometric design quality assessment model for mountain highways. **Accident Analysis & Prevention**, Elsevier, v. 157, p. 106172, 2021.