



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Civil



LUIZ HENRIQUE BAIOTO PINA REIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA VIABILIDADE E PROJETO FUNCIONAL DE UMA
ÁREA DE ESCAPE NA BR-050/MG: TRECHO ARAGUARI – UBERLÂNDIA**

UBERLÂNDIA

2025

LUIZ HENRIQUE BAIOTO PINA REIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA VIABILIDADE E PROJETO FUNCIONAL DE UMA
ÁREA DE ESCAPE NA BR-050/MG TRECHO ARAGUARI - UBERLÂNDIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Lemos Ribeiro

UBERLÂNDIA

2025

RESUMO

Por conta da ampla utilização do modo rodoviário no âmbito do transporte de cargas no Brasil, a malha rodoviária brasileira exerce um papel econômico fundamental no escoamento de pessoas e mercadorias entre grandes e pequenos centros urbanos. Devido a essa ampla utilização e a topografia montanhosa do país em algumas regiões, sinistros envolvendo veículos de carga desgovernados são recorrentes. Isso se deve às falhas mecânicas, panes elétricas e superaquecimento do sistema de frenagem dos veículos por sua constante solicitação nesses trechos íngremes extensos. Diante do exposto, no âmbito da segurança viária, uma medida corretiva a essa problemática são as áreas de escape adjacentes às margens das rodovias nesses longos trechos com declividade acentuada. A Rodovia BR-050 é a principal conexão entre os municípios de Uberlândia e Araguari, duas das cidades com maior expressão econômica e social na região do Triângulo Mineiro, no estado de Minas Gerais. Esse trecho da rodovia é amplamente utilizado como modo de transporte de cargas na região, porém possui uma topografia íngreme e de grande extensão. No entanto, no Brasil, não existem critérios técnicos específicos estabelecidos para a construção de rampas de escape, sendo necessário recorrer a manuais internacionais para orientar o desenvolvimento dessas estruturas de segurança. Dessa forma, esse trabalho tem por objetivo identificar o conjunto de critérios técnicos que envolvem a tomada de decisão para escolha da localização de uma área de escape para veículos desgovernados na BR-050/MG, trecho Araguari a Uberlândia e propor um projeto funcional como alternativa viável. Espera-se que este trabalho sirva de referência para outras rodovias brasileiras que necessitem implementar esse dispositivo de segurança, contribuindo assim para a diminuição de sinistros rodoviários fatais no país.

Palavras-Chaves: Área de escape, caminhões desgovernados, segurança viária, caixa de retenção, projeto geométrico.

ABSTRACT

Due to the widespread use of the highway mode for freight transportation in Brazil, the country's road network plays a fundamental economic role in the flow of people and goods between large and small urban centers. Because of this extensive use and the mountainous topography of certain regions, accidents involving out-of-control cargo vehicles are recurrent. This is due to mechanical failures, electrical malfunctions, and overheating of the braking system caused by its constant demand on these long, steep stretches. Given this context, in terms of road safety, a corrective measure for this issue is the implementation of escape areas adjacent to the highway margins along these long sections with steep slopes. The BR-050 highway is the main connection between the municipalities of Uberlândia and Araguari, two of the most economically and socially significant cities in the Triângulo Mineiro region, in the state of Minas Gerais. This section of the highway is widely used for freight transportation in the region, but it features a steep and extensive topography. However, in Brazil, there are no specific technical criteria established for the construction of escape ramps, requiring the use of international manuals to guide the development of these safety structures. Thus, this study aims to identify the set of technical criteria involved in decision-making for selecting the location of an escape area for out-of-control vehicles on the BR-050/MG, between Araguari and Uberlândia, and to propose a functional design as a viable alternative. It is expected that this study will serve as a reference for other Brazilian highways that need to implement this safety feature, thereby contributing to the reduction of fatal road accidents in the country.

Keywords: Escape ramp, out-of-control trucks, road safety, retention box, geometric design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do trabalho.....	13
Figura 2 – Representação freios a tambor.	16
Figura 3 – Representação de freios a disco.	17
Figura 4 – Rampa de escape.	19
Figura 5 – Área de escape com monte de areia na Alemanha.	20
Figura 6 – Área de escape com caixa de retenção.	21
Figura 7 – Tipos básicos de rampas de escape.	22
Figura 8 – Representação da prioridade dos principais critérios da pesquisa.	29
Figura 9 – Prioridade final dos subcritérios da pesquisa.	30
Figura 10 – Critério de implantação de rampas de escape com base no comprimento e na porcentagem da rampa.	34
Figura 11 – Mapa mostrando os DOTs estaduais que responderam à pesquisa.	35
Figura 12 – Mapa mostrando a existência de áreas de escape nos DOTs estaduais.	36
Figura 13 - Localização da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.	38
Figura 14 - Localização dos municípios de Araguari e Uberlândia.	39
Figura 15 - Localização do trecho da rodovia BR-050 entre os municípios de Araguari e Uberlândia.	39
Figura 16 - Localização trecho de estudo da rodovia BR-050 entre o km 39 e 64.	40
Figura 17 - Número de sinistros por km na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.	41
Figura 18 - Localização sinistros na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.	42
Figura 19 - Número de sinistros por pane mecânica do tipo falha no sistema de frenagem por km na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.	43
Figura 20 – Sinistros por gravidade da rodovia BR-050/MG entre o km 39 e 64 entre 2022 e 2024.	44
Figura 21 – Saídas de pista e tombamentos por quilometro na rodovia BR-050/MG entre o km 39 e 64 entre 2022 e 2024.	45
Figura 22 - Perfil de elevação das rampas na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64.	46
Figura 23 - Curvas horizontais da rodovia BR-050 entre o km 39 e 64.	47
Figura 24 - Curva horizontal km 56+180.	50
Figura 25 - Representação visual em planta do dispositivo na curva do km 56+180.	50

Figura 26 - Perfil longitudinal dos 50 metros iniciais da caixa de retenção adaptada das recomendações AASHTO.	56
Figura 27 – Dimensões da seta PEM “Siga em frente” do projeto.....	57
Figura 28 – Dimensões da seta PEM “Siga em frente ou vire à direita” do projeto. ...	58
Figura 29 – Disposição linhas ZPA proposto no projeto.....	59
Figura 30 – Disposição linhas MAN proposto no projeto.....	60
Figura 31 – Disposição linhas MAN proposto no projeto.....	60
Figura 32 – Sinalização Vertical de advertência da localização da área de escape.....	61
Figura 33 – Suporte de placas tipo coluna dupla utilizado no projeto funcional.	62
Figura 34 – Disposição em conjunto de placa especial de advertência e R-6c.	64
Figura 35 – Disposição em conjunto de placa indicativa e advertência da área de escape.	64
Figura 36 – Placa 1 de indicação educativa proposta no projeto funcional.	65
Figura 37 – Placa 2 de indicação educativa proposta no projeto funcional.	66
Figura 38 – Dimensões do marcador de perigo MP-3 utilizado no projeto funcional.	66
Figura 39 – Barreira rígida do tipo simples proposta no projeto funcional.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso das classes de caminhões mais comuns no Brasil.....	15
Tabela 2 – Fatores considerados pelas agências de rodovias americanas para 25	25
determinar a necessidade das áreas de escape.	25
Tabela 3 – Fatores considerados pelas agências de rodovias americanas para 27	27
determinar a localização das áreas de escape.	27
Tabela 4 – Critérios considerados na escolha da localização de rampas de escape.	28
Tabela 5 – Prioridade final dos subcritérios de pesquisa.....	30
Tabela 6 – Resultados da pesquisa sobre fatores considerados ao tentar determinar se	
deve ser instalada uma área de escape em novos locais (Questão 5).	37
Tabela 7 - Dados sinistros por pane mecânica do tipo falha no sistema de frenagem por	
km na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.....	43
Tabela 8 - Localização e raio das curvas horizontais da rodovia BR-050 entre o km 39	
e 64.	48
Tabela 9 - Trechos críticos segundos os critérios técnicos analisados.	49
Tabela 10 – Distâncias regulamentadas das setas PEM.	58
Tabela 11 – Dimensões regulamentadas das linhas ZPA.	59
Tabela 12 – Dimensões mínimas da Sinalização Vertical Especial de Advertência....	62
Tabela 13 – Características da Sinalização Vertical Especial de Advertência.	62
Tabela 14 – Sinalizações verticais de regulamentação utilizadas no projeto.	63
Tabela 15 – Dimensões recomendadas para os sinais de regulamentação de forma	
circular.	63
Tabela 16 – Forma e cores para placas de indicação educativas.	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos Gerais	11
1.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Justificativa.....	12
1.4	Estrutura do trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Características dos veículos pesados	14
2.1.1	Sistema de freio de caminhões	15
2.1.2	Comportamento térmico dos freios	17
2.2	Áreas de escape	18
2.2.1	Rampas de escape	18
2.2.2	Área de escape com monte de areia.....	19
2.2.3	Área de escape com caixa de retenção	20
	2.2.3.1 Greide ascendente	22
	2.2.3.2 Greide horizontal	22
	2.2.3.3 Greide descendente.....	23
2.3	Necessidade e localização de implantação: alguns estudos bibliográficos ..	23
2.3.1	Necessidade de implantação	23
2.3.2	Critérios para a escolha da localização	25
2.3.3	Método difuso de tomada de decisão multicritério	27
3	MÉTODO DOT - STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION	32
3.1	DOTs: Considerações quanto a escolha do local de implantação	32
3.2	DOTs: Pesquisa de relevância dos critérios	35
4	ESTUDO DE CASO.....	38
4.1	Local de Estudo	38
4.2	Histórico de Sinistralidade.....	40

4.3	Parâmetros Geométricos Existentes	45
4.3.1	Alinhamento Vertical: Rampas	45
4.3.2	Alinhamento Horizontal: Curvas	46
4.4	Impacto Ambiental, Econômico e Área de Implantação	48
5	RESULTADOS - PROJETO FUNCIONAL	50
5.1	Dimensionamento	51
5.1.1	Caixa de retenção	53
5.1.2	Material na superfície da caixa de retenção	53
5.1.3	Comprimento	54
5.1.4	Largura	55
5.1.5	Profundidade	55
5.2	Projeto de sinalização	56
5.2.1	Sinalização Horizontal	57
5.2.2	Sinalização Vertical	60
5.2.3	Dispositivos Auxiliares	66
6	CONCLUSÃO	68
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

O modo de transporte mais utilizado no Brasil para deslocamento de cargas e pessoas é o rodoviário, de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023). Ainda assim, os órgãos de fiscalização rodoviária enfrentam desafios na implementação de métodos eficazes para monitorar as condições mecânicas dos veículos que trafegam nas rodovias. Além disso, há preocupações sobre a negligência de motoristas face à sinalização viária, bem como o excesso de peso veicular. Diversos são os elementos que podem contribuir para sinistros de trânsito, incluindo as características do traçado rodoviário, como problemas de geometria, sinalização inadequada, curvas mal projetadas, ausência de dispositivos auxiliares, entre outros fatores. Considerando a significativa presença do transporte terrestre no país, segundo Reis e Pedrini (2023), os sinistros rodoviários devem ser examinados com atenção, dada sua importância para a economia e a sociedade.

A rodovia BR-050 é uma rodovia federal de importância nacional, com 1.105 quilômetros de extensão, conectando os estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Ela desempenha um papel crucial no transporte de produtos agrícolas para o litoral paulista, sendo amplamente utilizada pelos produtores rurais da região. De acordo com dados da Concessionária de Rodovias Eco050 (2024), responsável pela concessão do trecho entre Cristalina/GO e Delta/MG, os quilômetros 40 a 65,7 da BR-050 formam a principal ligação rodoviária entre Uberlândia e Araguari. Uma análise do tráfego realizado pela concessionária em 2023 revelou que o trecho mencionado registrou um fluxo total de 13.595.460 veículos, dos quais aproximadamente 24,1% (3.276.505 veículos) foram classificados como comerciais. Esses números destacam a significativa movimentação de veículos comerciais nessa rota, evidenciando a importância econômica e logística da rodovia BR-050 para a região. Entretanto, a segurança da via muitas vezes é comprometida devido a sua característica topográfica de declives longos e íngremes próximo ao rio Araguari.

Uma alternativa adotada como medida mitigatória de sinistros recentemente no Brasil em circunstâncias semelhantes é a implementação de áreas de escape adjacentes às rodovias. Segundo Reis e Pedrini (2023), essas áreas foram instaladas nos últimos anos, sendo mais reconhecidas na serra da Via Anchieta, em São Paulo, e na BR-376, no Paraná, entre Curitiba e o litoral catarinense. Essa abordagem é uma proposta de intervenção destinada a reduzir os impactos trágicos dos sinistros ocorridos nesses trechos rodoviários com declives longos e

íngremes. As áreas de escape nas rodovias são projetadas para ajudar a prevenir sinistros, especialmente em trechos de declive acentuado, onde os veículos podem perder o controle devido a problemas nos sistemas de freio. Estas áreas proporcionam um espaço seguro para dissipar a energia cinética dos veículos desgovernados, ajudando a evitar sinistros graves e fatais (ZANOLI, 2003).

No entanto, no Brasil, não existem critérios técnicos específicos estabelecidos para a construção de rampas de escape, sendo necessário recorrer a manuais internacionais para orientar o desenvolvimento dessas estruturas de segurança. Desse modo, o objetivo principal deste trabalho visa identificar os diversos aspectos técnicos que influenciam a decisão sobre a localização adequada de uma área de escape para veículos desgovernados na rodovia BR-050/MG, entre o trecho das cidades de Araguari e Uberlândia, no estado de Minas Gerais. Além disso, propõe-se um projeto funcional que abrange o desenvolvimento da geometria viária, bem como o projeto de sinalização vertical, horizontal e de dispositivos de segurança, oferecendo uma solução viável para avaliar trechos rodoviários sinuosos e com fortes rampas, a fim de indicar intervenções que aumentem a segurança e reduzam a ocorrência de sinistros.

1.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como principal objetivo identificar o conjunto de critérios técnicos que envolvem a tomada de decisão para escolha da localização de uma área de escape para veículos desgovernados, como uma medida de intervenção viária na BR-050/MG, trecho entre Araguari a Uberlândia. Além disso, propõe um projeto funcional que atenda a todos os critérios e parâmetros estabelecidos pelas normas e órgãos responsáveis.

1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, os objetivos secundários ou específicos são: análise do histórico de sinistralidade viária no trecho de estudo; análise dos sinistros de trânsito devido a falhas mecânicas no sistema de frenagem; análise da geometria e topografia do trecho; examinar os locais apropriados para instalação da área de escape; dimensionamento e escolha de materiais para a implantação da área de escape.

1.3 Justificativa

Conforme dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023), os sinistros nas rodovias federais geram despesas em torno de 14,1 bilhões de reais anualmente, representando cerca de 0,8% do PIB do país. Além disso, no ano de 2021 cerca de 1,19 milhões de indivíduos no mundo perderam suas vidas em decorrência de sinistros de trânsito, evidenciando um desafio crescente para o setor de saúde pública, já que isso é a principal causa de morte de crianças e jovens em todo o mundo, conforme dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021). Destaca-se também que, de acordo com informações da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2019) entre os anos de 2007 e 2019, houve cerca de 570 mil sinistros envolvendo ao menos um caminhão, representando 33% do total de sinistros registrados no período no Brasil.

No Brasil, de acordo com dados consolidados pelo Ministério da Saúde, o país registrou 33.894 mortes em sinistros de trânsito em 2022, o que equivale a uma média de aproximadamente 92 óbitos diários (Portal do Trânsito, 2024). Em relação às causas específicas dos sinistros fatais, um estudo da Confederação Nacional do Transporte (CNT), que analisou dados de 2007 a 2017, apontou que as saídas de pista representaram 14,5% dos sinistros com vítimas em rodovias federais (CNT, 2018). Nos Estados Unidos, de acordo com o Manual Roadside Design Guide, a porcentagem de sinistros decorrentes de saída de pista permanece elevada, representando cerca de 23% dos casos (AASHTO, 2011). Diante desses números, é essencial compreender quais tipos de sinistros devem ser priorizados em nossas rodovias para alcançarmos a meta de reduzir em 50% o número de mortes, conforme estabelecido pela 2ª Década de Ação para Segurança no Trânsito da ONU.

Zanoli (2003) ressalta a importância de os veículos de transporte de carga aderirem estritamente aos limites legais determinados pelas autoridades de trânsito, bem como às restrições técnicas estipuladas pelos fabricantes dos veículos, tais como o peso máximo permitido por eixo ou conjunto de eixos. Diversos fatores contribuem para a ocorrência de sinistro envolvendo caminhões, incluindo longas distâncias percorridas, pressão por prazos, fadiga, excesso de confiança, sobrecarga, manutenção veicular inadequada e, especialmente, problemas de frenagem em curvas acentuadas e declives íngremes (CNT, 2023).

Além das áreas de escape, há uma variedade de medidas para mitigar sinistros, como aprimoramentos na pavimentação, sinalização horizontal e vertical, instalação de dispositivos

físicos para separar faixas em sentidos opostos e intensificação da fiscalização. Entretanto, este trabalho se restringe especificamente à análise e proposta de um projeto funcional de área de escape, considerando-as uma solução crucial para trechos íngremes, onde veículos desgovernados representam um risco significativo à segurança viária.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre os temas de estudo, definindo também os objetivos do trabalho e sua justificativa, além da estruturação deste documento. No Capítulo 2, foi realizada uma revisão bibliográfica na literatura levantando materiais técnicos que discutem temas relacionados ao assunto deste trabalho, visando obter um embasamento teórico sólido. Na Metodologia, Capítulo 3, foram identificados os critérios técnicos, bem como suas respectivas importâncias e justificativas, utilizados para a escolha do local mais adequado para a implantação de áreas de escape, com base na revisão da literatura técnica. Enquanto no Capítulo 4 é realizado o estudo de caso, onde foram coletados dados relacionados ao trecho em estudo, como topografia, inclinação, extensão e histórico de sinistros, com o objetivo de aplicar os critérios técnicos levantados no Capítulo 3, e por fim apontar o melhor local para a implantação da área de escape no trecho estudado. No Capítulo 5 é apresentado o projeto funcional proposto para o local de estudo e, finalmente, no Capítulo 6 são dispostas as conclusões e sugestões para a área de escape e recomendações para trabalhos futuros. A Figura 1 indica, em um fluxograma, a estruturação do trabalho em questão.

Figura 1 - Estrutura do trabalho.



Fonte: Autor, (2024).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção são apresentadas as principais referências bibliográficas sobre temas relacionados aos mecanismos de segurança viária no que tange às áreas de escape, cujo objetivo foi de embasar os estudos para a análise de viabilidade e construção do projeto funcional para o local em questão, incluindo o projeto geométrico, critérios de projeto, sinalização vertical e horizontal.

2.1 Características dos veículos pesados

Este item aborda os principais fatores relacionados à perda de freios em veículos pesados do tipo caminhão ao descer longas e íngremes declividades. Primeiramente, são discutidas as características de peso dos caminhões que fazem parte da frota nacional. Em seguida, é explorada a frenagem e os sistemas de freios mais comuns em caminhões.

Para garantir a segurança, os veículos que circulam pelas rodovias brasileiras devem obedecer aos limites legais estabelecidos pelas autoridades de trânsito e às restrições técnicas impostas pelos fabricantes. Esses limites determinam os valores máximos de peso bruto por eixo ou por conjunto de eixos, levando em conta o número de pneus e o espaçamento entre os eixos.

Os limites legais de peso para caminhões, no Brasil, são estabelecidos pelo CONTRAN (2021), por meio da Resolução 882/21, em vigor desde 13 de dezembro de 2021. Conforme a resolução, o peso bruto total (PBT) para algumas das principais classes são: a) PBT para veículo não articulado: 29 toneladas; b) peso combinado de veículos com reboque ou semirreboque, exceto caminhões: 39,5 toneladas; c) PBTC para combinações de veículos articulados com duas unidades, do tipo caminhão-trator e semirreboque, e comprimento total inferior a 16 m: 45 toneladas; d) PBTC para combinações de veículos articulados com duas unidades, do tipo caminhão-trator e semirreboque com eixos em tandem triplo e comprimento total superior a 16 m: 54,5 toneladas. No entanto, o peso máximo também é restrito pelo fabricante, devido a especificações técnicas que atendem às características do projeto do veículo. As classes de caminhões mais comuns nas rodovias nacionais e o limite de peso bruto total desses veículos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Peso das classes de caminhões mais comuns no Brasil.

Principais Configurações de Veículos Usadas no País	Peso Máximo Permitido por Eixo	PBT leia mais	PBT + Tolerância de 5%
Caminhão 	6+10	16,0t	16,800t
Caminhão Trucado 	6+17	23,0t	24,150t
Caminhão Simples 	6+25,5	31,5t	33,075t
Caminhão Duplo Direcional Trucado 	6+6+17	29,0t	30,450t
Caminhão + Reboque 	6+10+17	33,0t	34,650t
Caminhão + Reboque 	6+10+10+17	43,0t	45,150t
Caminhão Trucado + Reboque 	6+17+10+17	50,0t	52,500t

Fonte: ANTT, (2022).

2.1.1 Sistema de freio de caminhões

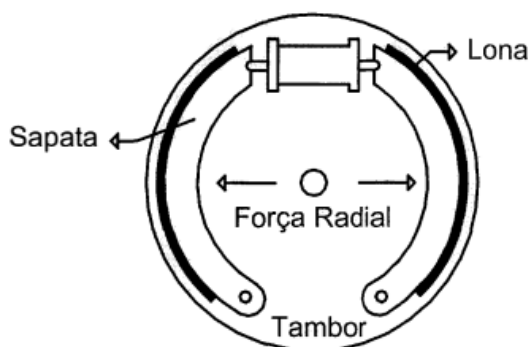
O sistema de freios dos veículos, especialmente em veículos pesados, tem o propósito de assegurar uma desaceleração segura conforme as demandas de tráfego e as regulamentações. Dependendo das condições e da configuração do veículo, a frenagem pode envolver diferentes eixos, como o semirreboque, permitindo várias possibilidades operacionais durante o processo (FERNANDES, 2017).

Durante o movimento, os veículos possuem energia mecânica na forma de energia cinética e potencial. No processo de frenagem, o sistema de freios converte essa energia mecânica em outras formas, principalmente energia térmica (calor) e, em menor grau, energia acústica (ruído) (ZANOLI, 2003). O funcionamento dos freios baseia-se no atrito entre dois corpos que são pressionados um contra o outro. Esse atrito gera um dos principais problemas do sistema de freios: o superaquecimento, que pode danificar os freios e resultar em sinistros

rodoviários. Veículos com excesso de carga ou operando em condições inadequadas estão mais suscetíveis a esse problema.

Os freios a tambor, ilustrados na Figura 2, são comumente empregados nas rodas traseiras de veículos de passeio e caminhonetes, sendo menos frequentes nas rodas dianteiras desses veículos. No entanto, eles são amplamente utilizados nos freios de caminhões médios e pesados, ônibus, reboques e semi-reboques segundo Fernandes (1994, *apud* Zanoli, 2003).

Figura 2 – Representação freios a tambor.

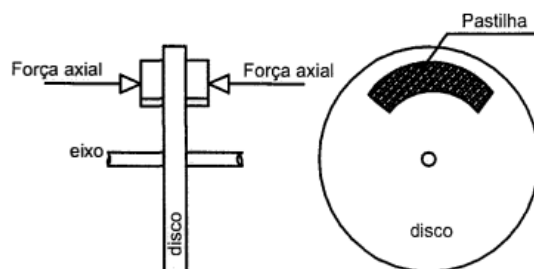


Fonte: Zanoli, (2003).

O fator de freio é determinado pela relação entre a força de frenagem gerada no contato entre as lonas e o tambor e a força necessária para comprimir as lonas contra o tambor. Os freios a tambor são sensíveis à temperatura. Quando a temperatura atinge valores entre 400°C e 530°C, pode ocorrer uma diminuição na eficiência da frenagem devido à alteração dos coeficientes de atrito e ao aumento do diâmetro do tambor, o que reduz o contato entre a lona e o tambor segundo Limpert (1992, *apud* Zanoli, 2003).

Segundo Fernandes (1994, *apud* Zanoli, 2003) outro tipo de freio comum na frota brasileira é o freio a disco, composto por um disco solidamente fixado ao eixo da roda e por pastilhas instaladas em uma pinça acoplada ao chassi. Durante o processo de frenagem, as pastilhas são pressionadas axialmente contra a superfície lateral do disco, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Representação de freios a disco.



Fonte: Zanoli, (2003).

Os freios a disco foram desenvolvidos para oferecer uma capacidade de resfriamento mais rápida em comparação aos freios a tambor, uma vez que a eficiência de frenagem melhora com a diminuição da temperatura. Eles possuem uma área maior de ventilação (toda a superfície do disco) e uma área de atrito relativamente menor, equivalente à superfície da pastilha (ZANOLI, 2003). A maior vantagem dos freios a disco é a capacidade de operar com um mínimo de desvanecimento (fade) ou fadiga em altas temperaturas, que podem variar entre 800°C e 900°C. Limpert (1992, *apud* Zanoli, 2003) explicita que o termo "fade" é utilizado para descrever a perda de atrito da lona ou pastilha devido ao calor gerado durante a frenagem.

2.1.2 Comportamento térmico dos freios

Durante o processo de frenagem, ocorre atrito entre lonas e tambores ou pastilhas e discos, resultando no aumento de temperatura entre esses componentes, o que eleva a temperatura do sistema de freios. Lonas e pastilhas são tipicamente feitas de materiais com baixa condutividade térmica, o que significa que apenas cerca de 5% do calor gerado durante a frenagem é absorvido por elas segundo Iombriller, (1997, *apud* Zanoli, 2003).

Veículos comerciais pesados podem alcançar temperaturas superficiais máximas nos freios na faixa de 300 a 400°C, o que pode comprometer a eficiência da frenagem para Limpert, 1992, *apud* Zanoli). A temperatura máxima suportada pelo sistema de freio é um fator crucial que afeta o desempenho da frenagem. A temperatura elevada pode gerar efeitos indesejados em duas situações críticas segundo Zanoli (2003): frenagem moderada de longa duração e frenagem severa de curta duração. A frenagem de longa duração ocorre em descidas prolongadas, onde é

essencial dissipar todo o calor gerado para o ambiente, mantendo a temperatura do sistema dentro dos limites seguros dos materiais envolvidos. A maneira como o calor é dissipado durante a frenagem é um aspecto crítico para o funcionamento eficiente dos freios.

A pesquisa sobre as características de peso e sistemas de freios de caminhões visa ajudar na análise das causas de sinistros em declives, além de destacar a importância de utilizar veículos em condições operacionais adequadas. Isso contribui diretamente para a redução de sinistros causados por falhas nos sistemas de freios.

2.2 Áreas de escape

Os mecanismos destinados a conter veículos fora de controle têm a função de absorver a energia cinética gerada por esses veículos, compensando a falha dos freios de serviço. Esses dispositivos são classificados conforme o método de frenagem empregado. As categorias mais comuns incluem rampas de escape, montes de areia e sistemas de retenção com caixas de contenção, conhecidos respectivamente em inglês como "escape ramps", "sandpiles", e "arrester beds" (AASHTO, 2018). A seguir serão apresentadas as diferentes características dessas categorias.

2.2.1 Rampas de escape

As áreas ou rampas de escape, conhecidas em inglês como "*escape ramp*", em sua forma mais básica, são classificadas como rampas de gravidade. Essas rampas consistem em saídas pavimentadas ou não, geralmente construídas com material compactado em locais estratégicos, com uma inclinação acentuada, onde veículos desgovernados desaceleram devido à resistência da rampa e a uma pequena resistência ao rolamento (AASHTO, 2018). No entanto, em casos de falha total dos freios, a superfície de material compactado pode não ser suficiente para evitar que os veículos retomem a descida, ultrapassando os limites da área de escape e, em algumas situações, voltando para as faixas de rolamento da via. A seguir, é possível visualizar uma rampa de escape instalada na estrada Misiryeong, na província de Gangwon, Coreia do Sul (HENRIQUE, 2019).

Figura 4 – Rampa de escape.



Fonte: Henrique, (2019).

As primeiras rampas de gravidade foram construídas nos Estados Unidos, devido à facilidade de instalação e aos custos reduzidos de construção. Contudo, ao longo do tempo, essas rampas foram substituídas por tipos mais seguros de áreas de escape, como aquelas que utilizam superfícies de material solto. Esse material permite a penetração dos pneus dos veículos desgovernados, evitando que, mesmo sem freios, eles retornem à via (AASHTO, 2018).

2.2.2 Área de escape com monte de areia

As áreas de escape conhecidas como montes de areia, ou "*sandpiles*" em inglês, consistem em saídas não pavimentadas formadas por montes de areia ou terra (Figura 3.4). Nessas áreas, veículos desgovernados reduzem sua velocidade devido à alta resistência ao rolamento, resultante da penetração fácil dos pneus no material solto da superfície (AASHTO, 2018). Nesse tipo de sistema, a elevada resistência ao rolamento gera uma desaceleração intensa, o que pode comprometer a segurança da frenagem. Embora a alta desaceleração ofereça um risco aos ocupantes do veículo, ela também permite que o veículo pare em um espaço menor. Os montes de areia são uma solução viável em locais onde há necessidade de dispositivos de contenção, mas o espaço físico disponível para a sua implantação é limitado

(ZANOLI, 2003). Abaixo na figura 5 é possível visualizar uma área de escape do tipo monte de areia implantada em uma rodovia na Alemanha (HENRIQUE, 2019).

Figura 5 – Área de escape com monte de areia na Alemanha.



Fonte: Henrique, (2019).

2.2.3 Área de escape com caixa de retenção

Segundo a associação de transportes americana AASHTO (2018), os dispositivos de frenagem que utilizam sistemas de caixas de retenção, como ilustrado na Figura 6, são projetados para parar caminhões desgovernados utilizando a resistência ao rolamento, que ocorre quando as rodas do veículo penetram no material solto que preenche a caixa. As caixas de retenção podem ser construídas em qualquer inclinação, pois não dependem da inclinação da rampa para deter o veículo. Em diversos casos, essas caixas são instaladas em rampas de gravidade para reduzir a distância de frenagem e prevenir que o caminhão retorne à estrada (AASHTO, 2018).

Um dos benefícios das áreas de escape com caixa de retenção é que esses dispositivos requerem pouca manutenção, sendo necessária apenas a recomposição da superfície do material na caixa após o uso e o afofamento periódico para evitar a compactação do material de preenchimento. Uma desvantagem desse tipo de dispositivo é a necessidade de um método eficaz para a remoção dos veículos, além de um sistema de drenagem adequado para coletar

águas da chuva e outras substâncias, como combustíveis, óleos e cargas líquidas dos caminhões segundo Jones (1982 *apud* Zanoli, 2003).

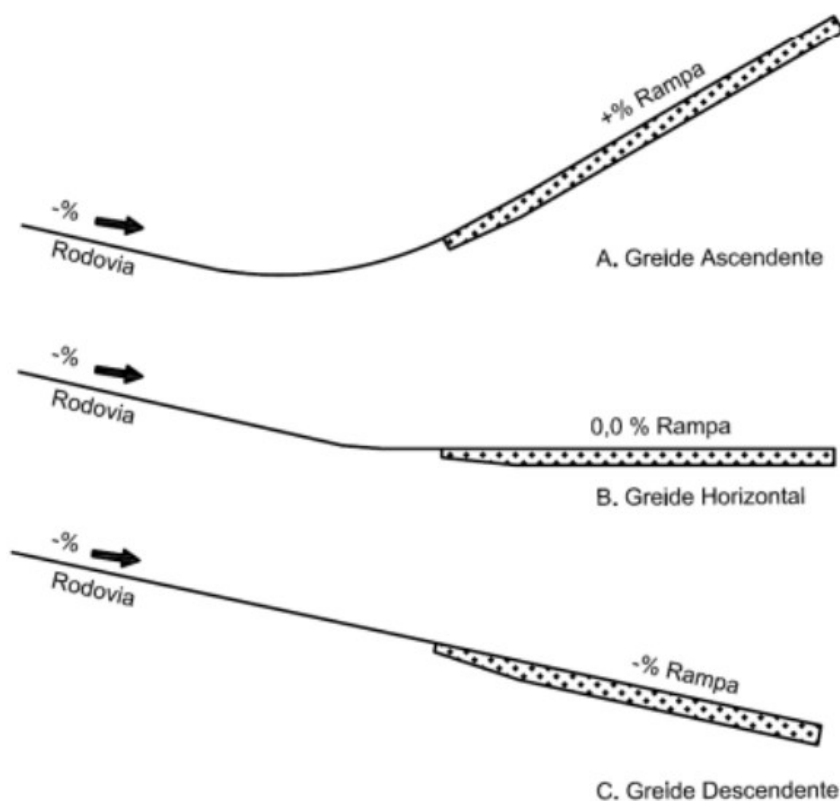
Figura 6 – Área de escape com caixa de retenção.



Fonte: Alves, (2021).

Como mencionado anteriormente, a caixa pode ter diferentes inclinações, permitindo que seja adaptada às condições topográficas da rodovia onde será instalada. Dependendo da inclinação da caixa de retenção, as áreas de escape são classificadas da seguinte forma, conforme apresentado na Figura 7:

Figura 7 – Tipos básicos de rampas de escape.



Fonte: Rodrigues, (2023).

2.2.3.1 Greide ascendente

Essas áreas de escape utilizam a resistência da rampa que atua contra o movimento do veículo, em conjunto com a resistência ao rolamento, para desacelerar o veículo. A intensidade da desaceleração tende a ser maior devido à combinação dessas duas forças, o que reduz a distância necessária para parar o veículo. As áreas de escape ascendentes são as mais comuns, pois oferecem a vantagem de frear os veículos em distâncias mais curtas (AASHTO, 2018).

2.2.3.2 Greide horizontal

Essas áreas de escape são caracterizadas pela ausência da resistência de rampa, com a resistência ao rolamento sendo a única força responsável pela desaceleração do veículo. Normalmente, esses dispositivos necessitam de um comprimento maior para parar veículos fora de controle (ZANOLI, 2003).

2.2.3.3 Greide descendente

Essas áreas de escape dependem exclusivamente da resistência ao rolamento para desacelerar os veículos, enquanto a resistência da rampa atua na mesma direção do movimento, aumentando a velocidade do veículo. A combinação vetorial dessas forças resulta em uma desaceleração menos intensa em comparação com os casos anteriores, o que exige uma distância maior para que o veículo seja completamente parado (AASHTO, 2018). Cada tipo de área de escape é projetado para uma situação específica, sendo ajustado de acordo com as características topográficas do local onde será implementado.

2.3 Necessidade e localização de implantação: alguns estudos bibliográficos

Ao optar pela instalação de uma área de escape como uma alternativa para aumentar a segurança em um trecho de via, é essencial realizar uma análise que ajude a selecionar o local mais adequado para a construção do dispositivo. Essa escolha deve ser baseada na premissa de que o local selecionado interceptará o maior número possível de veículos desgovernados.

2.3.1 Necessidade de implantação

Áreas de escape são instaladas com o objetivo de interceptar veículos desgovernados, sendo assim, o custo de instalação desses dispositivos deve ser justificado por uma diminuição no número de vítimas e nos danos materiais causados por caminhões que perdem os freios em declives. Portanto, primeiramente é fundamental realizar um estudo sobre a utilidade e viabilidade da implantação de uma área de escape para garantir que o dispositivo seja eficaz e aumente a segurança do transporte de veículos em declives. Segundo a AASHTO (2018), é necessário realizar uma análise dos registros de sinistros juntamente com uma avaliação de engenharia para determinar a necessidade de implantar áreas de escape em rodovias com longos declives.

Segundo Abdelwahab e Morral (1997), um estudo foi realizado para identificar as variáveis que influenciam a necessidade de implantação de áreas de escape em rodovias em regiões montanhosas. As variáveis analisadas foram:

1. Características dos veículos;
2. Presença de áreas para verificação dos freios no início do declive;
3. Comportamento dos motoristas de caminhão antes e durante a descida;
4. Perfis horizontais de velocidade dos caminhões, temperaturas dos freios e localização dos sinistros ao longo do declive;
5. Identificação de locais onde a velocidade dos veículos ultrapassa o limite permitido e onde a temperatura dos freios atinge níveis críticos de fadiga (fade).

Abdelwahab e Morral (1997) concluíram que a implantação de áreas de escape é essencial quando ocorre uma alta frequência de sinistros envolvendo veículos sem freios, quando a temperatura dos freios dos veículos ao longo do declive ultrapassa o valor crítico de fadiga (fade), e quando a velocidade dos veículos desgovernados excede a velocidade de tombamento nas curvas horizontais da rodovia.

Em um outro estudo realizado nos Estados Unidos, segundo Zanolli (2003), questionários foram enviados às agências de rodovias para identificar os principais fatores considerados por essas agências na avaliação da necessidade de implantação de áreas de escape. Para determinar quando é necessária a instalação de uma área de escape, três critérios devem ser analisados: a presença de problemas com veículos fora de controle; a possibilidade de mitigar o problema com um sistema de sinalização e informações adequado; e a existência de condições adequadas para a construção de uma área de escape. A Tabela 2 apresenta os fatores considerados e o número de agências que os citaram no estudo mencionado acima.

Tabela 2 – Fatores considerados pelas agências de rodovias americanas para determinar a necessidade das áreas de escape.

Fatores considerados	Número de agências
Ocorrência de acidentes com veículos fora de controle	14
Comprimento do declive	8
Porcentagem de inclinação	8
Porcentagem de caminhões	5
Condições no final do declive	4
Trafego diário médio	3
Curvatura horizontal	3
Gravidade dos acidentes	1
Disponibilidade de faixa de domínio	1
Topografia	1

Fonte: Zanoli, (2003).

Ainda abordando o tema de necessidade de implantação de uma área de escape, um documento produzido pela NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (2022) discute a importância da avaliação de risco baseada no desempenho para projetos de segurança rodoviária, especialmente em intervenções nas laterais das vias, recomendando a análise de custo-benefício. A realização de uma análise incremental de custo-benefício requer uma compreensão abrangente de todos os custos diretos do projeto, pagos pela agência rodoviária. Recomenda-se o uso do software *Roadside Safety Analysis Program (RSAP)* para realizar análises de custo-benefício com base em invasões de pista em projetos nas laterais de rodovias.

2.3.2 Critérios para a escolha da localização

No que se refere aos critérios técnicos que devem ser levados em consideração na escolha da localização da área de escape em um trecho, é importante ressaltar que não existem Normas técnicas vigentes específicas deferidas por um órgão regulador, existindo assim somente recomendações em manuais. A decisão final depende de um estudo de engenharia que deve considerar os seguintes aspectos: topografia, espaço físico disponível, distância em relação ao topo do declive, geometria da via, a possibilidade de reduzir os custos de construção do dispositivo e o histórico de sinistros no trecho em declive de estudo.

Diante do exposto, a AASHTO (2018) aconselha o levantamento de estudos voltados para as seguintes áreas:

- Estudo do índice de sinistros em trechos de declive: Embora sinistros com veículos desgovernados possam ocorrer em várias partes do declive, uma análise detalhada pode identificar pontos específicos onde o número de sinistros é mais significativo.

- Verificação da velocidade de tombamento em curvas horizontais: É importante construir áreas de escape antes das curvas horizontais que podem provocar o tombamento de veículos desgovernados devido ao excesso de velocidade.

- Análise da temperatura do sistema de freios: Recomenda-se o uso do programa de computador *Grade Severity Rating System* (GSRS) para avaliar a temperatura dos freios ao longo do declive. Os veículos podem perder os freios quando a temperatura ultrapassa 260°C, conhecido como ponto de fade.

- Análise da velocidade dos veículos: A velocidade com que os veículos provavelmente atingirão o dispositivo deve ser considerada ao escolher o local de construção, a fim de evitar que os veículos desgovernados entrem na área de escape em velocidades excessivamente altas.

Uma recomendação de Setra (1993) é que quando não for possível realizar um estudo detalhado para determinar a localização ideal, a área de escape deve ser construída no segundo terço do declive. Caso seja necessário instalar mais de um dispositivo, eles devem ser posicionados com uma distância aproximada de 2 km entre si.

Como continuidade do estudo mencionado anteriormente, referente ao questionário enviado a diferentes agências rodoviárias americanas sobre a necessidade de implantação de áreas de escape, há também questionários relacionados à localização dessas áreas nas rodovias. Engenheiros pesquisaram os fatores considerados pelas agências estaduais de rodovias ao determinar o local ideal em um declive para a implantação de uma área de escape. A Tabela 3 apresenta esses fatores e o número de agências que os mencionaram.

Tabela 3 – Fatores considerados pelas agências de rodovias americanas para determinar a localização das áreas de escape.

Fatores citados	Número de agências
Condições topográficas	8
Alinhamento Horizontal	5
Localização de acidentes	5
Condições no final do declive	2
Disponibilidade de faixa de domínio	1
Contribuição dos motoristas de caminhão	1
Velocidade dos veículos fora de controle	1
Comprimento do declive	1

Fonte: Zanolli, (2003).

Diante do estudo apresentado, é possível destacar 3 fatores principais levados em consideração na decisão da escolha da localização da área de escape, que são: condições topográficas do trecho em estudo; alinhamento horizontal das curvas; e a análise histórica da sinistralidade da região e suas localizações.

2.3.3 Método difuso de tomada de decisão multicritério

Com o objetivo de incorporar pesquisas e estudos mais recentes na área, nesta seção é apresentado o artigo de pesquisa de Heidarian et. al (2022), em inglês: “*Location of Emergency Escape Ramps on Two-Lane Rural Highways Based on the Fuzzy Multicriteria Decision-Making Method*”; em português: Localização de Rampas de Escape de Emergência em Rodovias Rurais de Duas Faixas com Base no Método difuso de Tomada de Decisão Multicritério.

No artigo de Heidarian et. al (2022), na intenção de levantar a ordem do peso da importância dos diferentes critérios utilizados para a escolha da localização de uma área de escape, 3 critérios gerais e 16 subcritérios foram classificados, e, por fim, a importância dos critérios foi analisada pelo “*fuzzy analytic hierarchy process*” (F-AHP), em português, processo hierárquico analítico difuso, e as opções de alta prioridade foram ilustradas utilizando

a “fuzzy technique for order performance by similarity to ideal solution” (F-TOPSIS), em português, técnica difusa para desempenho de ordenação por similaridade com a solução ideal. As opções propostas foram avaliadas e priorizadas para uma rampa de escape de emergência na rodovia rural de duas faixas no trecho da vila de Salavat Abad, na cidade de Sanandaj, província de Curdistão, Irã.

Por meio da elaboração de questionários de pesquisa e sua distribuição entre especialistas, foram identificados os fatores que influenciam a localização de rampas de escape de emergência nas rodovias rurais de duas faixas. Além disso, ao consultar o Departamento de Estradas e Desenvolvimento Urbano da Província do Curdistão, foram coletados dados e outras informações necessárias, incluindo as variáveis com maior impacto na localização da rampa (HEIDARIAN et. al, 2022). Ao consultar a polícia de trânsito da Província do Curdistão, foram obtidos dados estatísticos de sinistros, especialmente a taxa de sinistros envolvendo caminhões descontrolados, assim como as especificações técnicas dos caminhões que tinham maior volume de tráfego. Realizadas essas pesquisas e questionários, os 3 critérios gerais e 16 subcritérios obtidos estão representados na Tabela 4 a seguir.

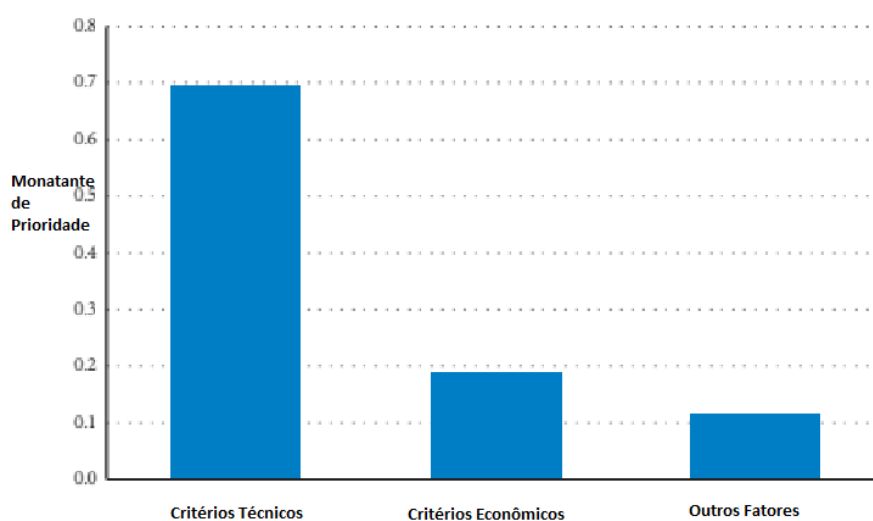
Tabela 4 – Critérios considerados na escolha da localização de rampas de escape.

Critérios	Símbolo do Critério	Subcritério	Símbolo do Subcritério
Técnicos	C1	Comprimento da inclinação longitudinal	S11
		Percentual de inclinação longitudinal	S12
		Velocidade de projeto do veículo	S13
		Faixa de domínio disponível	S14
		Raio da curva horizontal	S15
		Capacidade de desenvolvimento físico	S16
		Nível de serviço do tráfego	S17
Econômicos	C2	Custo de aquisição de terrenos	S21
		Custo de construção (volume de terraplenagem)	S22
		Custos operacionais	S23
Outros Fatores	C3	Estatísticas de acidentes (caminhões desgovernados)	S31
		Percentual de caminhões em trânsito	S32
		Tráfego médio diário	S33
		Acesso a serviços rodoviários públicos	S34
		Condições no final da inclinação longitudinal	S35
		Efeitos ambientais	S36

Fonte: Adaptado de Heidarian et. al, (2022).

Levantados todos os critérios e subcritérios, a opinião dos especialistas foi quantificada usando uma escala difusa. Onde após a aplicação do método matricial analítico do F-AHP, foram dados pesos de importância aos 3 diferentes critérios, resultando no gráfico representado na Figura 8, com os critérios técnicos, econômicos e outros fatores com peso de 0.695; 0.190; 0.115 respectivamente.

Figura 8 – Representação da prioridade dos principais critérios da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Heidarian et. al, (2022).

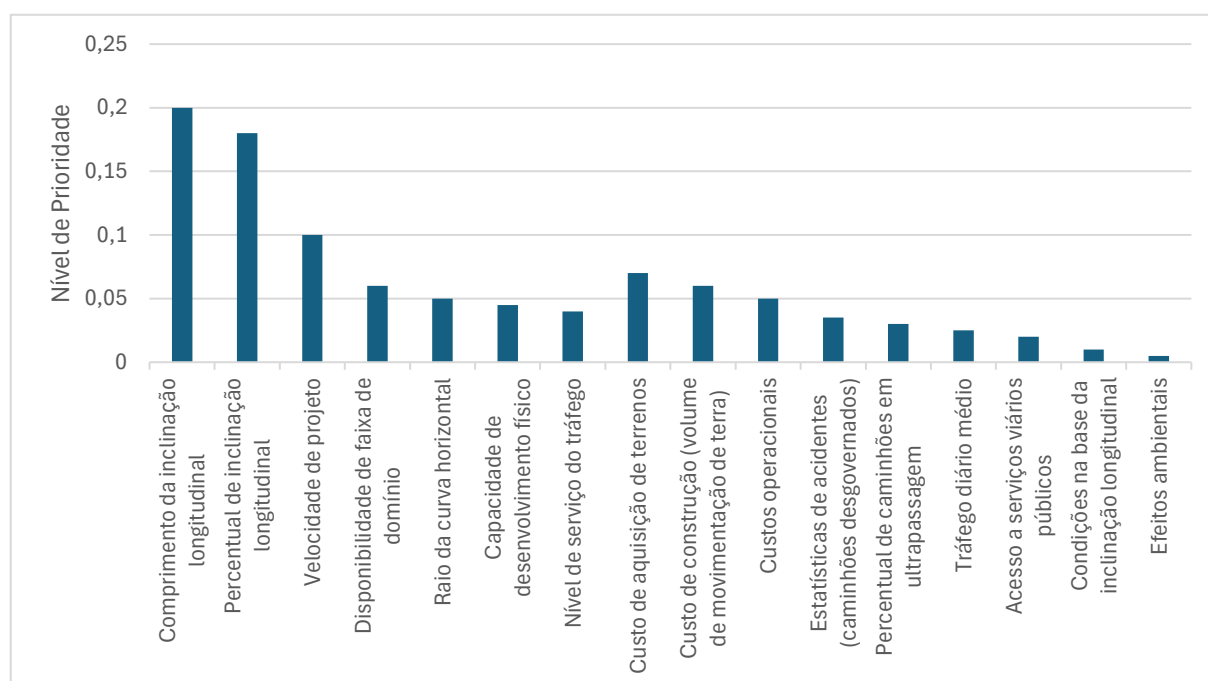
Neste estudo, o TOPSIS foi usado para selecionar a opção mais adequada para localização de rampas de fuga de emergência para caminhões que tiveram problemas no sistema de freios, onde a melhor localização é aquela que mais se distancia dos fatores negativos e, consequentemente, se aproxima dos fatores/critérios positivos. Levantados os pesos dos 3 critérios principais, seguiu-se a pesquisa com a análise de pesos de cada um dos 16 subcritérios, onde após a sua combinação com o peso do critério no qual faz parte, é gerado um peso final de importância daquele subcritério dentro de toda a pesquisa (HEIDARIAN et. al, 2022). Como resultado tem-se a Tabela 5 com os respectivos pesos de critério, subcritério e final, juntamente com a representação gráfica apresentada na Figura 9.

Tabela 5 – Prioridade final dos subcritérios de pesquisa.

Crítérios	Peso do Critério	Subcritério	Peso do Subcritério	Peso Final
Técnicos	0.695	Comprimento da inclinação longitudinal	0.272	0.189
		Percentual de inclinação longitudinal	0.283	0.197
		Velocidade de projeto do veículo	0.157	0.109
		Faixa de domínio disponível	0.075	0.052
		Raio da curva horizontal	0.084	0.058
		Capacidade de desenvolvimento físico	0.077	0.054
		Nível de serviço do tráfego	0.053	0.037
Econômicos	0.19	Custo de aquisição de terrenos	0.423	0.080
		Custo de construção (volume de terraplenagem)	0.285	0.054
		Custos operacionais	0.292	0.056
Outros Fatores	0.115	Estatísticas de acidentes (caminhões desgovernados)	0.372	0.043
		Percentual de caminhões em trânsito	0.282	0.032
		Tráfego médio diário	0.189	0.022
		Acesso a serviços rodoviários públicos	0.102	0.012
		Condições no final da inclinação longitudinal	0.024	0.003
		Efeitos ambientais	0.030	0.003

Fonte: Adaptado de Heidarian et. al. (2022).

Figura 9 – Prioridade final dos subcritérios da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Heidarian et. al, (2022).

Neste estudo, foram apresentados dois métodos comuns para a análise de critérios relacionados à importância das rampas de fuga e à escolha de locais adequados para seu projeto. A importância desses critérios foi explorada utilizando a metodologia F-AHP. Por fim, a proposta de localização das rampas de fuga de emergência foi desenvolvida com base na técnica F-TOPSIS. Os resultados da pesquisa indicaram que os critérios mais relevantes foram a porcentagem de inclinação longitudinal, o comprimento da inclinação e a velocidade de projeto, considerados critérios técnicos, os quais se mostraram mais significativos em comparação com critérios econômicos e fatores de tráfego.

Na análise dos principais critérios, os resultados mostraram que os critérios técnicos, com 69% de importância, foram o fator mais decisivo na localização das rampas de fuga de emergência. Os critérios econômicos e outros fatores tiveram importâncias de 19% e 11%, respectivamente, sendo considerados posteriormente (HEIDARIAN et. al, 2022). No total, os seguintes subcritérios foram avaliados dentro dos três critérios principais:

(i) Os subcritérios considerados muito importantes, com porcentagem de importância acima de 10%:

- Porcentagem de inclinação longitudinal: 19,7%
- Comprimento da inclinação longitudinal: 18,9%
- Velocidade de projeto: 10,9%

(ii) Os subcritérios considerados importantes, com porcentagem de importância entre 5% e 10%:

- Custo de aquisição de terreno: 8%
- Raio de curvatura horizontal: 5,8%
- Custo operacional: 5,6%
- Custo de construção: 5,4%
- Capacidade de desenvolvimento físico: 5,4%
- Direito de passagem disponível: 5,2%

(iii) Os subcritérios considerados intermediários, com porcentagem de importância entre 3% e 5%:

- Estatísticas de sinistros: 4,3%

- Nível de serviço do tráfego: 3,7%
- Porcentagem de caminhões que passam: 3,2%

(iv) Os subcritérios considerados fracos, com porcentagem de importância inferior a 3%:

- Tráfego diário médio: 2,2%
- Acesso a serviços públicos: 1,2%
- Condições na base da inclinação longitudinal: 0,3%
- Efeitos ambientais: 0,3%

3 MÉTODO DOT - STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION

Apresentados os estudos acima no que se refere a necessidade e escolha do local de implantação das áreas de escape, é importante destacar que eles foram apresentados somente para critério de conhecimento e difusão das pesquisas. Diante disso, esse Capítulo busca apresentar as principais considerações e práticas atuais utilizadas para a escolha do local de implantação de uma área de escape que serão considerados no Capítulo de “Estudo de Caso”. Para isso, serão consideradas as práticas usadas pelos “*States Department of Transportation*” (DOTs) dos Estados Unidos, para projetar e operar instalações de áreas de escape para veículos fora de controle viajando em declives íngremes. As informações para este estudo foram coletadas por meio de uma revisão de literatura, uma pesquisa de DOTs estaduais e entrevistas de acompanhamento com DOTs selecionados realizados pela NATIONAL ACADEMIES, no ano de 2024.

3.1 DOTs: Considerações quanto a escolha do local de implantação

Vários manuais dos DOTs estaduais incluem fatores a serem considerados na seleção de um local apropriado para uma rampa de escape (NATIONAL ACADEMIES, 2024). Fatores comuns incluem os seguintes critérios:

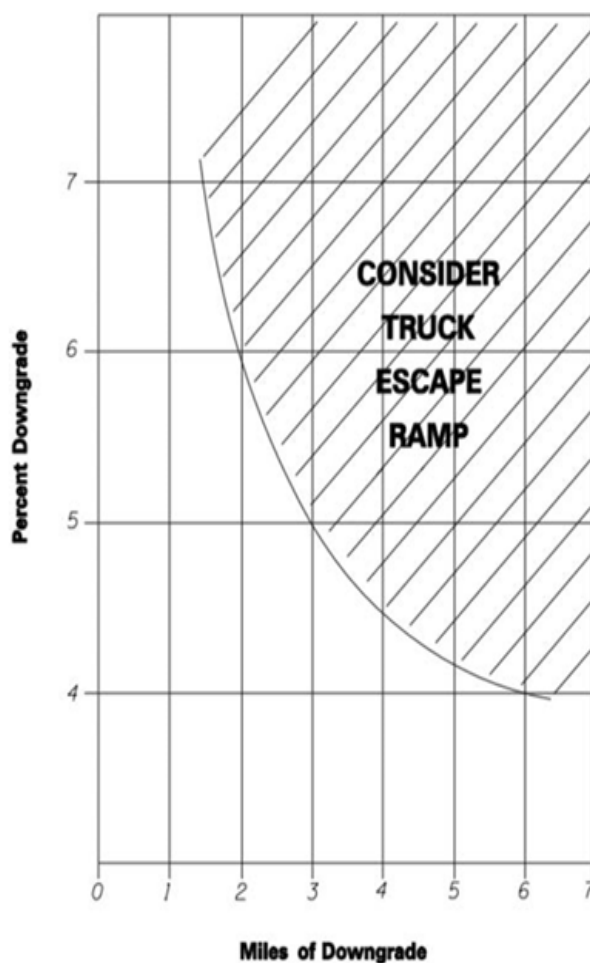
- Topografia/terreno;
- Comprimento e porcentagem de inclinação;

- Condições do final do trecho em declive;
- Velocidade de projeto;
- Histórico de sinistros com caminhões desgovernados;
- Alinhamento horizontal;
- Tráfego diário médio;
- Porcentagem de caminhões;
- Direito de ultrapassagem disponível;
- Distância de visibilidade;
- Gastos/economia;
- Impacto ambiental.

Além de estabelecerem informações gerais sobre os critérios de escolha do local, alguns DOTs também apresentam considerações específicas, como no caso dos estados do Arizona e da Pensilvânia. Isso ocorre porque a topografia das rodovias nesses estados é mais acidentada em comparação a outras regiões, o que gera uma maior necessidade de implantação de áreas de escape para veículos desgovernados, resultando em uma demanda mais intensa por estudos e pesquisas nessa área.

Conforme ilustrado na Figura 10, o DOT do Arizona estabelece algumas recomendações quanto à decisão de se implantar uma rampa de escape ou não com base no comprimento e declividade das rampas. Dois pontos importantes de se considerar no gráfico são os próximos aos extremos, onde se vê necessária a implantação de uma área de escape em uma rampa mais curta, com 2,4 quilômetros (1,5 milhas) de comprimento aproximadamente, porém com uma alta declividade, como 7,1%. Assim como em uma rampa mais extensa, de 9,65 quilômetros (6 milhas) aproximadamente e com uma declividade menor, como 4%.

Figura 10 – Critério de implantação de rampas de escape com base no comprimento e na porcentagem da rampa.



Fonte: Arizona DOT, (2022).

Em seu Manual de Projeto (2023), o DOT da Pensilvânia fornece mais orientações sobre como localizar a melhor área para a implantação de uma rampa de escape, conforme mostrado abaixo:

- Para interceptar o maior número de veículos desgovernados, como na base da descida ou em pontos intermediários ao longo da descida;
- Em qualquer local prático onde o alinhamento da estrada principal seja tangente;
- Antes de curvas horizontais que não podem ser trafegadas por veículos desgovernados;
- Antes de áreas povoadas;
- Do lado direito da via.

O Departamento de Transportes do Estado de Washington afirma em seu Manual de Projeto de Estradas que "locais desejáveis incluem trechos antes de uma curva crítica, próximos

Tabela 6 – Resultados da pesquisa sobre fatores considerados ao tentar determinar se deve ser instalada uma área de escape em novos locais (Questão 5).

CrITÉrios	Sempre	Geralmente	Às vezes	Raramente	Nunca
Declividade da Rampa	67%	17%	0%	0%	0%
Comprimento da Rampa	67%	17%	0%	0%	0%
Volume de Caminhões	67%	0%	0%	0%	0%
Volume de Tráfego	67%	17%	0%	0%	0%
Custo de Implatação	50%	17%	17%	0%	0%
Histórico de Falhas Mecânicas	83%	17%	0%	0%	0%
Julgamento da Engenharia	83%	0%	0%	0%	0%
Impactos Ambientais	50%	17%	0%	0%	0%
Melhorias futuras no Corredor	17%	33%	0%	0%	0%
Contribuição da Indústria					
Transporte Rodoviário	33%	50%	0%	0%	0%
Veículos com Excesso de Peso	33%	33%	0%	0%	0%
Terreno	67%	17%	0%	0%	0%
Condições do Solo	17%	0%	50%	0%	0%
Disponibilidade de espaço suficiente no lado direito da via	33%	50%	0%	0%	0%
Outros (por favor descrever)	33%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Adaptado de National Academies, (2024).

Os resultados indicam que o histórico de sinistros e o julgamento de engenharia são considerados com mais frequência, enquanto as melhorias futuras do corredor e as condições do solo são consideradas com menos frequência. Todos os fatores são considerados até certo ponto pelos seis DOTs estaduais que responderam. Um DOT estadual mencionou a topografia como outro fator a ser levado em consideração.

Entre os 21 DOTs estaduais que responderam que não têm áreas de escape, os motivos mais comumente citados para não possuírem são a ausência de declives acentuados para justificar a necessidade (19 DOTs) e terreno plano (10 DOTs). Outros motivos incluem baixos volumes de caminhões, maior prioridade para outras iniciativas e a ausência de um histórico de sinistros de caminhões que saíram da estrada para justificar a necessidade desses dispositivos (NATIONAL ACADEMIES, 2024).

4 ESTUDO DE CASO

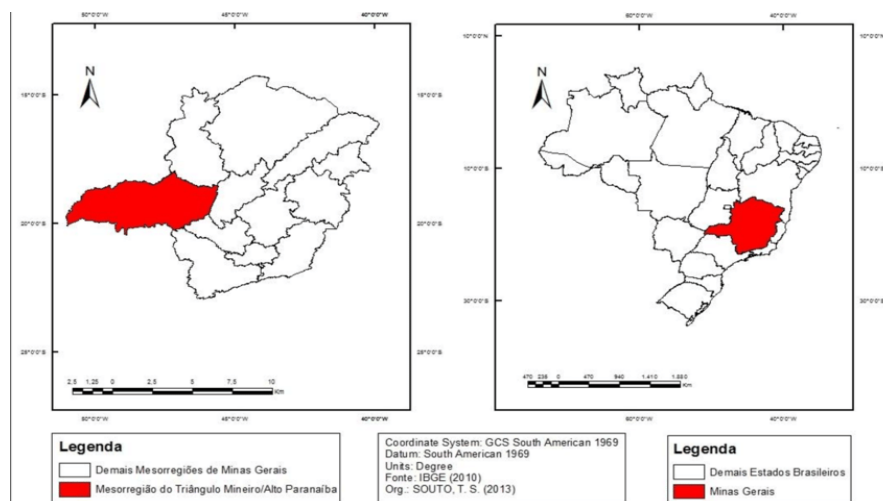
A rodovia na qual foi realizado o estudo de viabilidade e critérios técnicos para implantação de uma área de escape foi a BR-050, trecho sob concessão da empresa Eco050, em Minas Gerais.

4.1 Local de Estudo

A área em estudo encontra-se localizada entre os municípios de Uberlândia e Araguari, situado na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no estado de Minas Gerais. Trata-se do segmento entre o km 39 e km 64 da rodovia federal BR-050, contida no mapa da Figura 15 e destacada na Figura 16.

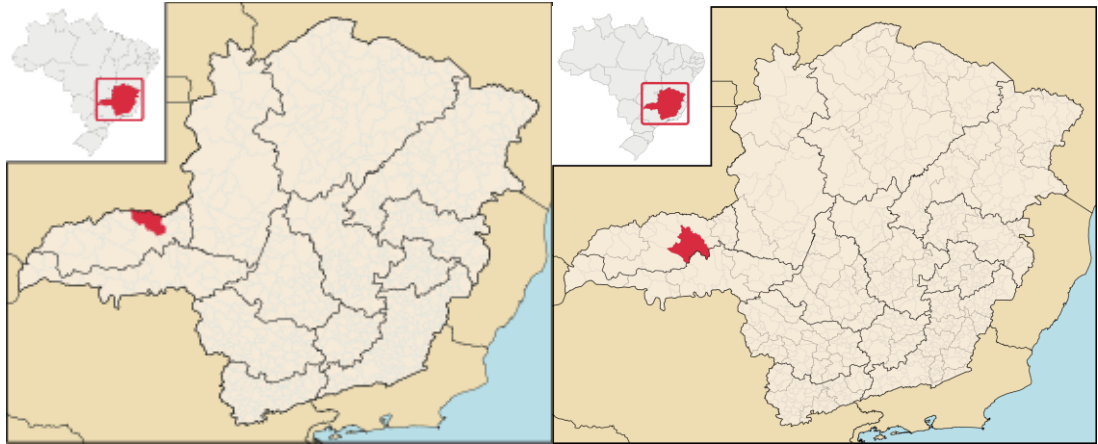
O município de Uberlândia possui uma área territorial de aproximadamente 4.115.206 km² e uma população de cerca de 713.224 pessoas, sendo classificado como Classe 2B na hierarquia urbana, ou seja, uma capital regional, com suma importância para a economia do estado de Minas Gerais e principalmente na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (IBGE, 2022). Do lado oposto do Rio Araguari, rio esse que separa os dois municípios, encontra-se o município de Araguari, com uma área territorial de aproximadamente 2.729,777 km² e uma população de cerca de 117.808 pessoas, classificada como 3B, ou seja, Centro Subregional. Destaca-se a importância geoeconômica e social do trecho em estudo para a região e o seu escoamento de cargas e materiais, uma vez que a BR-050 é a principal via que conecta esses dois importantes municípios da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

Figura 13 - Localização da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.



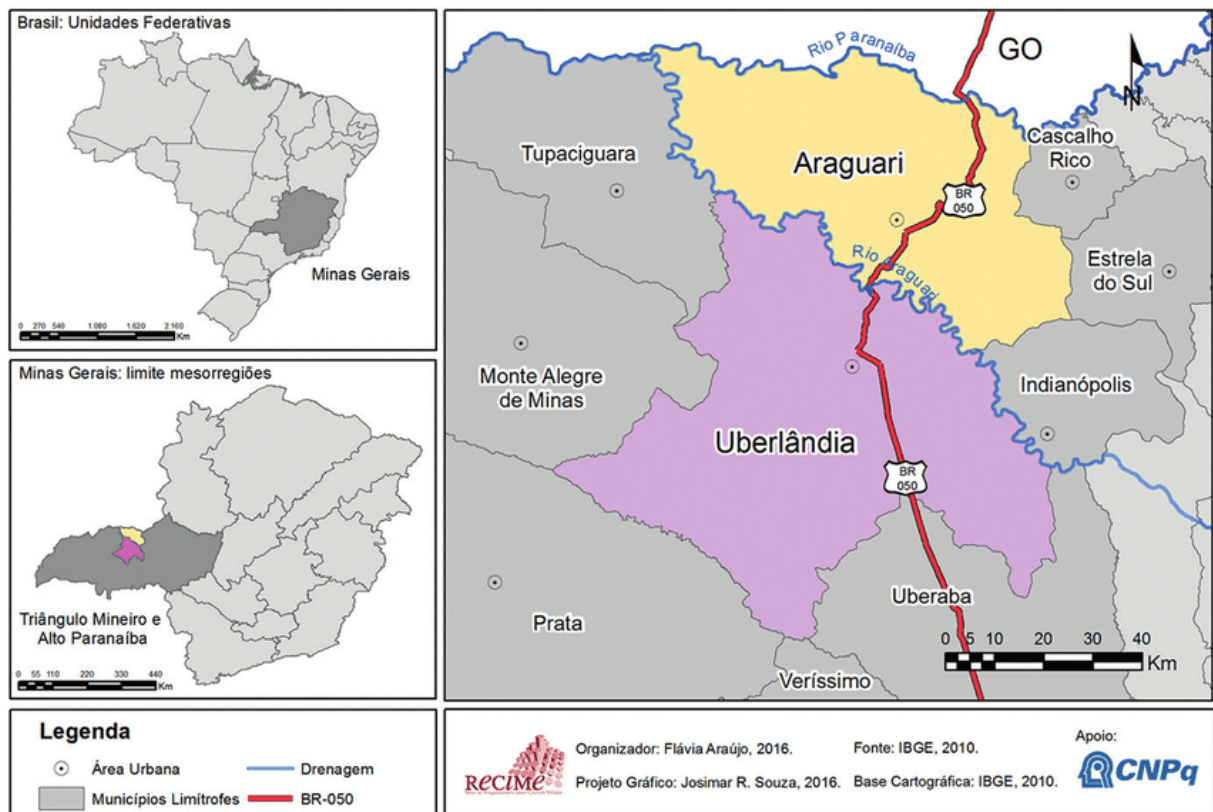
Fonte: Souto (2013).

Figura 14 - Localização dos municípios de Araguari e Uberlândia.



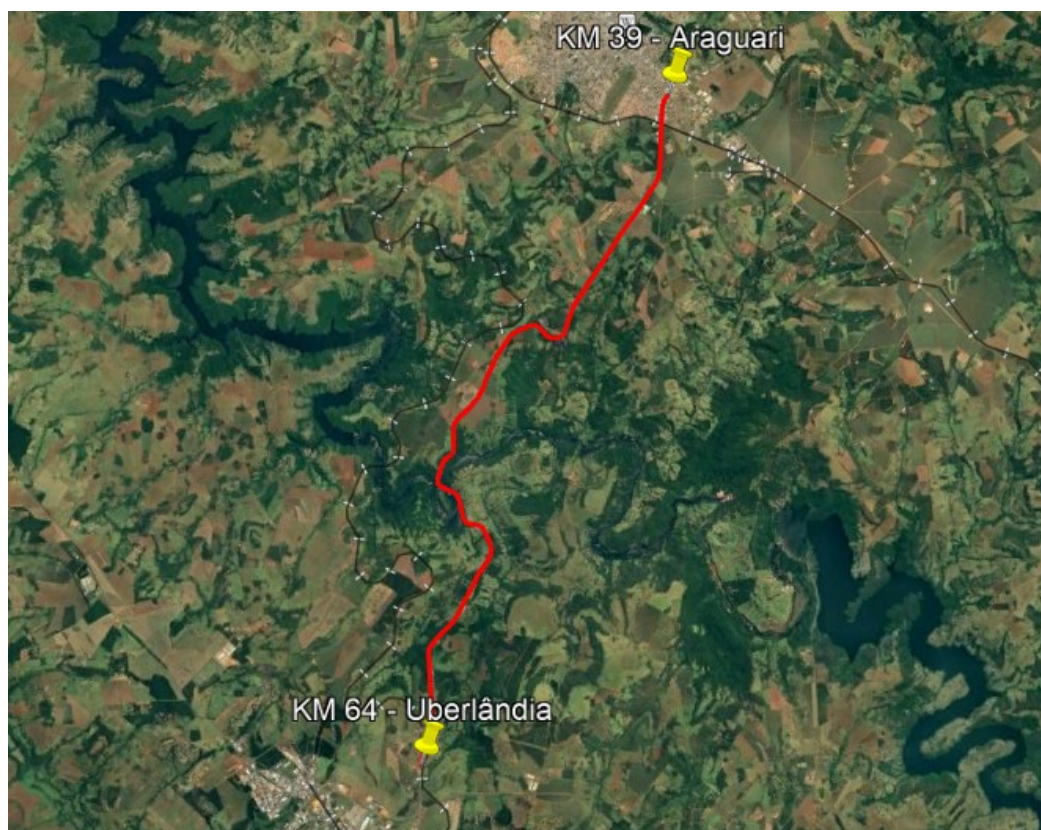
Fonte: Autor (2024).

Figura 15 - Localização do trecho da rodovia BR-050 entre os municípios de Araguari e Uberlândia.



Fonte: Calixto (2016).

Figura 16 - Localização trecho de estudo da rodovia BR-050 entre o km 39 e 64.



Fonte: Autor (2024) adaptado de *Google Earth Pro* (2024).

O local no qual foi realizado o estudo possui um total de 15 curvas horizontais, com raios variando entre 150 e 840 metros. A região crítica dá-se entre o km 51 ao km 59, onde inicia o declive de forma mais acidentada em relação ao terreno.

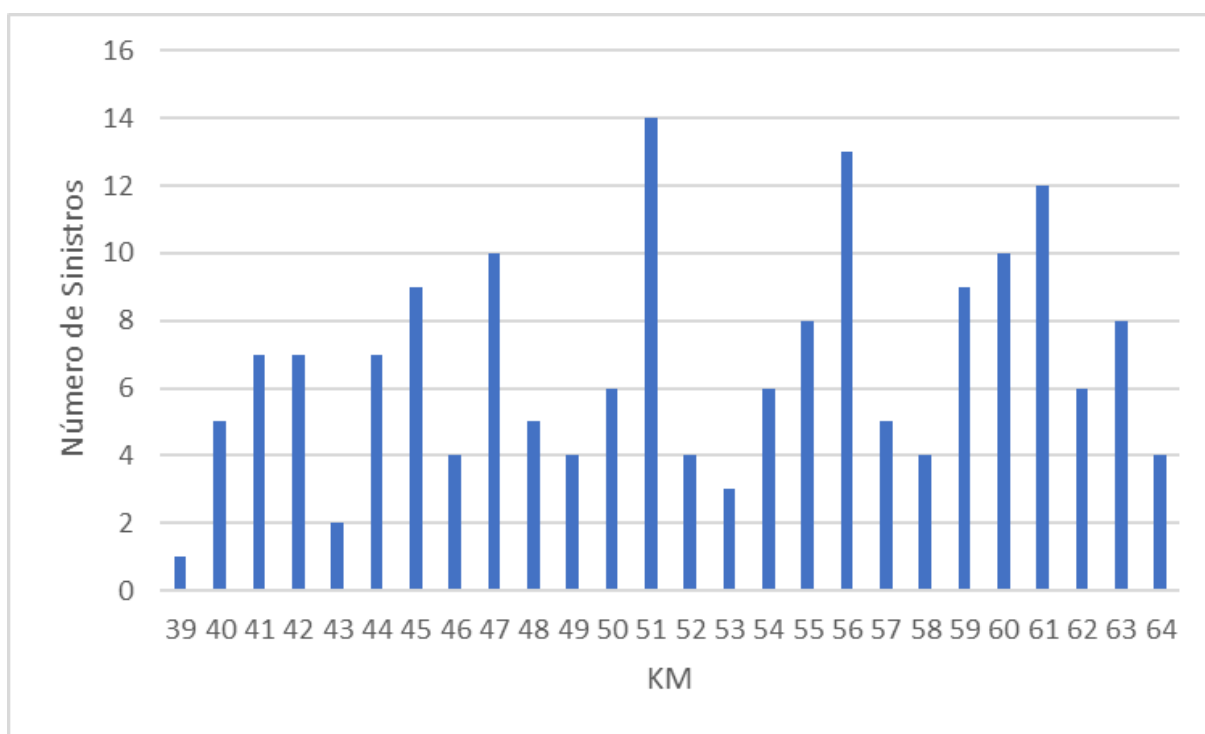
4.2 Histórico de Sinistralidade

Para o levantamento desses índices, foi utilizada uma base de dados de sinistros que abrange o período de janeiro de 2023 a janeiro de 2024. Essas informações foram obtidas através da base de dados públicos da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), através de consultas no seu respectivo *site*, cujo número do protocolo do processo consultado foi: 50500.040615/2024-91. O levantamento dessa base de dados de sinistros rodoviários é uma obrigação do setor de Operações da concessionária do trecho e faz parte da rotina diária do setor. Após o levantamento desses dados, a empresa os fornece para a ANTT, que é órgão

público responsável pela fiscalização do cumprimento das exigências do contrato de concessão da rodovia estudada.

Em um primeiro passo, um levantamento quanto aos pontos onde há maior incidência de sinistros foi feito, sendo assim, os dados iniciais utilizados foram referentes à extensão total da rodovia BR-050 concessionada pela empresa Eco050. O *site* onde as informações foram coletadas possibilitam a elaboração de dados contendo o ano desejado, bem como a quantidade de sinistros que ocorreram no trecho específico de estudo. O primeiro ponto de análise consultado foram os km nos quais ocorreram os sinistros, sendo assim, os dados iniciais utilizados foram referentes à extensão total do trecho de estudo, entre as áreas urbanas dos municípios de Uberlândia e Araguari, ou seja, entre o km 39 ao 64, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Número de sinistros por km na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.



Fonte: Adaptado de Eco050, (2024).

Nesse mesmo local, a fim de aprofundar o estudo, é possível obter a classificação do sinistro em relação a sua gravidade, podendo ser classificados em 3 grupos: sinistro com danos materiais, sinistro com vítimas e sinistro com vítima fatal. Foram obtidas informações para cada

quilômetro do trecho, em relação a quantidade de 1.656 sinistros que são ilustrados na Figura 18.

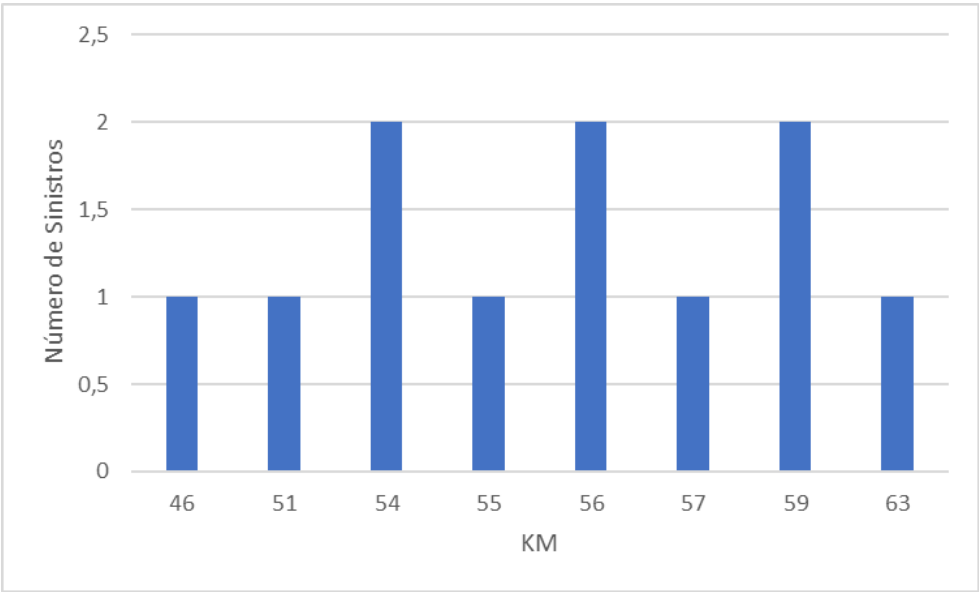
Figura 18 - Localização sinistros na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.



Fonte: Adaptado de Eco050, (2024).

Nesta próxima análise, a partir dos dados que estão disponíveis para consulta, foi considerado o ano de referência (2023), o local da rodovia onde ocorreram os acidentes (km), os veículos que estiveram envolvidos, o sentido da via que os sinistros ocorreu (neste caso, norte ou sul), classificação dos sinistros quanto a sua gravidade, a característica geométrica do local do sinistro quanto ao alinhamento horizontal, a causa provável para que o sinistro tenha ocorrido e uma breve descrição dos mesmos. Foi possível observar se o sinistro foi devido a falha mecânica (perda de freio), pois a base de dados utilizada para elaboração do estudo classifica o sinistro quanto ao seu possível motivo causador. Diante disso, o gráfico da Figura 19 e os dados dos sinistros apresentados na Tabela 7 são referentes apenas às ocorrências onde a causa provável do sinistro seja a perda dos freios.

Figura 19 - Número de sinistros por pane mecânica do tipo falha no sistema de frenagem por km na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.



Fonte: Adaptado de Eco050, (2024).

Tabela 7 - Dados sinistros por pane mecânica do tipo falha no sistema de frenagem por km na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 em 2023.

Data Ocorrência	Tipo de Acidente	Classificação Ocorrência	Sentido	KM+MT	Traçado da Pista	Período do dia
21/10/2023	Choque - Veículo parado na pista	Sinistro com Danos Materiais	Norte	45,9	Reta	Noite
30/10/2023	Colisão Traseira	Sinistro com Danos Materiais	Sul	51	Reta	Noite
17/05/2023	Choque - Elemento de Drenagem	Sinistro com Danos Materiais	Sul	53,7	Reta	Dia
03/04/2023	Capotamento	Sinistro com Vítima	Sul	54	Curva Suave	Noite
11/06/2023	Queda de Moto	Sinistro com Danos Materiais	Norte	55,2	Curva Acentuada	Dia
10/11/2023	Tombamento	Sinistro com Vítima	Norte	55,6	Curva Acentuada	Dia
31/10/2023	Tombamento	Sinistro com Vítima	Norte	56,15	Curva Acentuada	Dia
04/12/2023	Choque - Elemento de Drenagem	Sinistro com Danos Materiais	Norte	57	Curva Suave	Dia
15/04/2023	Choque - Sinalização	Sinistro com Danos Materiais	Norte	58,9	Curva Suave	Dia
19/10/2023	Colisão Traseira	Sinistro com Danos Materiais	Norte	59	Curva Acentuada	Dia
16/06/2023	Engavetamento	Sinistro com Danos Materiais	Norte	62,9	Reta	Dia

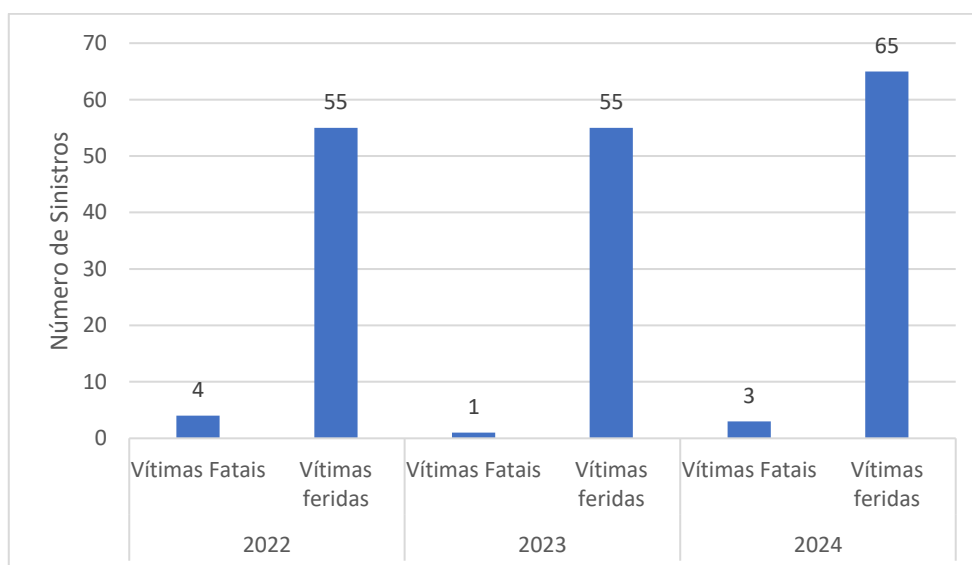
Fonte: Adaptado de Eco050, (2024).

Diante do exposto no estudo do histórico de sinistralidade, é possível afirmar que ele confirma a necessidade de implantação de um dispositivo de área de escape, uma vez que somente no ano de 2023 foram observados 11 sinistros em uma extensão de 17 quilômetros dentro do trecho de estudo derivados de uma falha mecânica especificada como perda de freios. Conclui-se que quanto a esse critério de análise referente a escolha do local de implantação da área de escape, o ponto mais crítico corresponde ao trecho entre o km 54 e o km 59.

No estudo do histórico de sinistralidade realizado acima, as ocorrências foram tratadas conforme a causa provável dos sinistros, no caso, a pane mecânica no sistema de frenagem. Isso é necessário, pois através dela, foi possível mapear os sinistros que possuíam uma grande probabilidade de utilizar a rampa de escape caso ela existisse no local. Contudo, é importante considerar também os sinistros que não tiveram como causa provável a pane nos freios, mas que possivelmente poderiam utilizar a rampa de escape para evitá-lo. Exemplifica-se essa realidade com sinistros do tipo saída de pista e tombamento, que segundo o Manual de Segurança Viária do DER/SP (2023) podem ser acomodados por dispositivos de segurança viária nas laterais da via, no caso desse estudo, a rampa de escape.

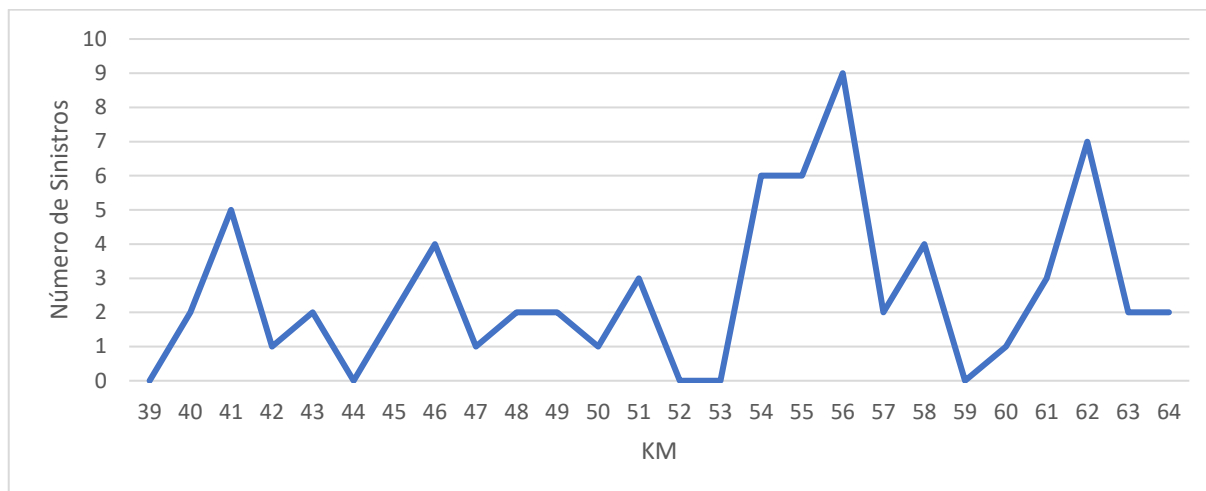
Utilizando uma outra base de dados afim de aprofundar esse segundo estudo, foi analisado o histórico de sinistralidade levantado pela Polícia Rodovia Federal (PRF) responsável pelo trecho dos últimos 3 anos, ou seja 2022, 2023 e 2024. É importante destacar que essa base considera apenas os sinistros com vítimas fatais e sinistros com vítimas. Ilustrado na Figura 20 está um gráfico resumo de sinistros por gravidade no trecho de estudo da rodovia BR-050/MG, enquanto na Figura 21 constam apenas os sinistros de saída de pista e tombamentos por quilometro, visando evidenciar o ponto crítico da rodovia quanto a esses tipos de sinistros. Analisando esses dados, é possível confirmar o trecho crítico segundo o critério de histórico de sinistralidade sendo o ponto entre os km 54 e km 58, sendo este compatível com o resultado da análise de panes no sistema de frenagem realizada anteriormente.

Figura 20 – Sinistros por gravidade da rodovia BR-050/MG entre o km 39 e 64 entre 2022 e 2024.



Fonte: Adaptado de PRF (2025).

Figura 21 – Saídas de pista e tombamentos por quilometro na rodovia BR-050/MG entre o km 39 e 64 entre 2022 e 2024.



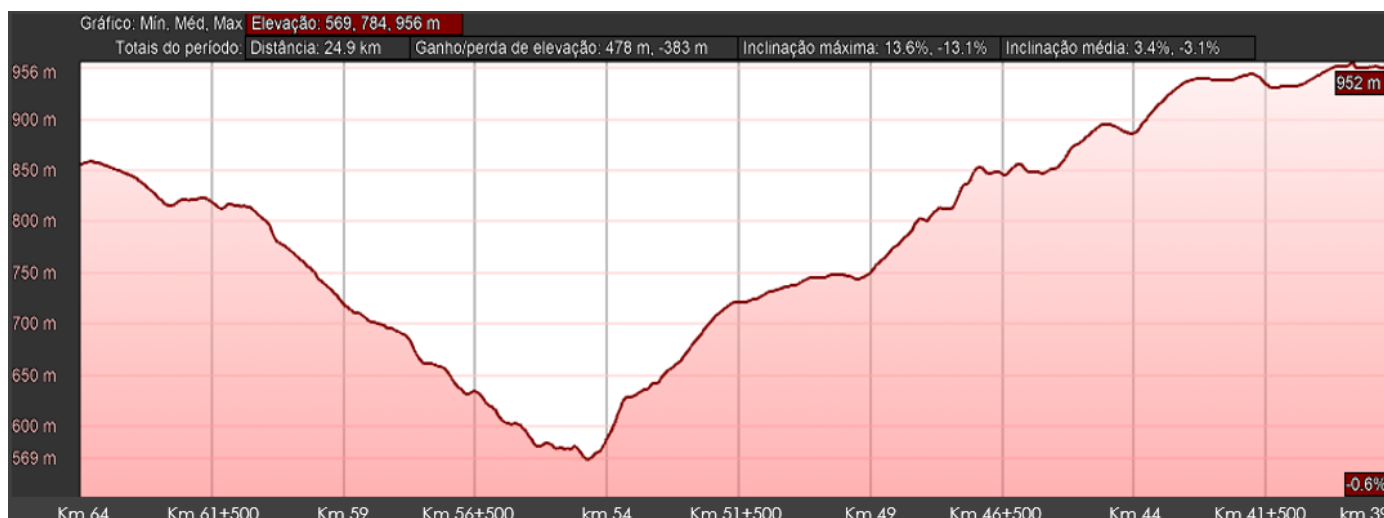
Fonte: Adaptado de PRF (2025).

4.3 Parâmetros Geométricos Existentes

4.3.1 Alinhamento Vertical: Rampas

Conforme visto anteriormente, outra análise a ser realizada é a que define as características geométricas da rodovia, nesse caso específico, suas inclinações predominantes, extensões do declive e aclive e o quão sinuoso o trecho é, sendo um fator considerável quando há sinistros (ZANOLI, 2003). Com o auxílio do software “Google Earth Pro (2024)”, foi possível fazer o levantamento do perfil de elevação do trecho de estudo conforme ilustrado na Figura 22. É importante apontar que para efeito de análise, os valores aparentes no eixo x do gráfico são referentes a extensão do trecho em quilômetros, onde o km 0 ilustrado no gráfico representa o km 64 real da rodovia, assim como o km 24,8 no gráfico representa o km 39,2 real, no sentido decrescente.

Figura 22 - Perfil de elevação das rampas na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64.



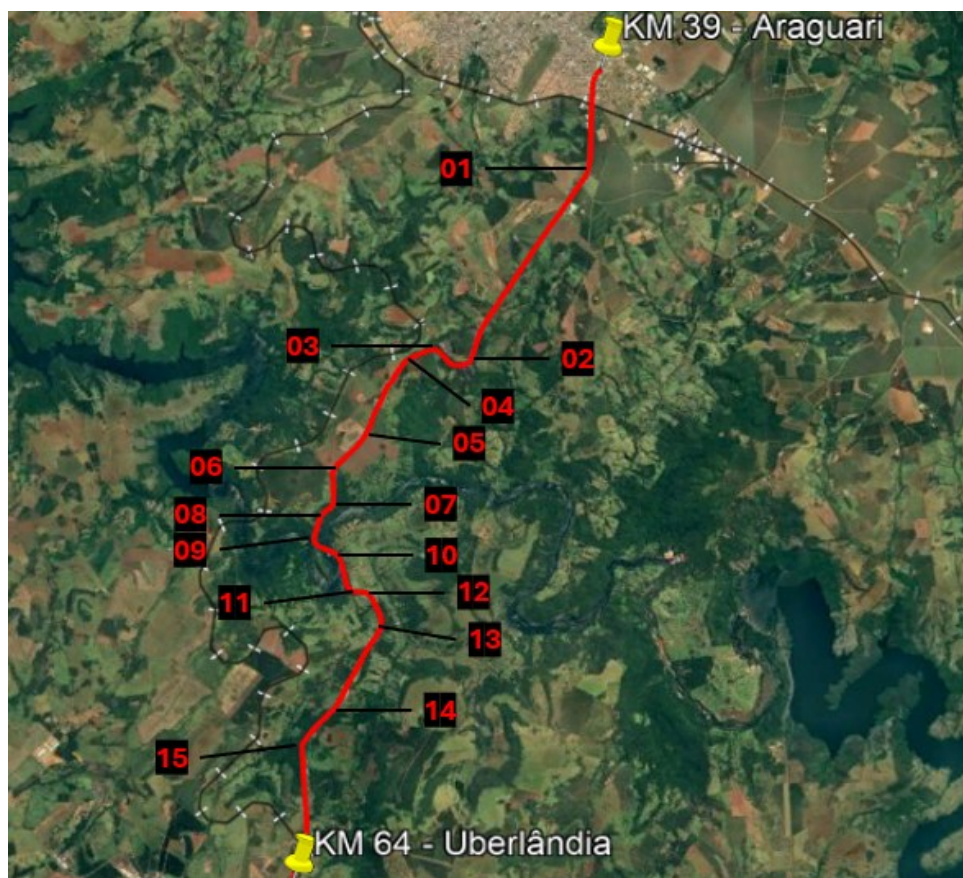
Fonte: Autor (2024) adaptado de *Google Earth Pro* (2024).

Segundo o perfil de elevação do traçado, o trecho de estudo possui uma inclinação média de 3,4%, com uma extensão de 25 quilômetros e um ganho/perda de elevação de até 478 metros. Os pontos mais críticos quanto ao critério de alinhamento vertical são aqueles que possuem as rampas mais extensas com inclinações mais íngremes. Analisando o perfil de elevação quanto a esse critério, destacam-se os trechos que antecedem o rio Araguari (km 54+500) em ambos os sentidos. Segundo dados extraídos do *Google Earth Pro*, o primeiro no sentido de deslocamento norte, trata-se do trecho entre os km 54+500 e 61, com 6,5 quilômetros de extensão e rampa máxima de 7%. Já a segunda entre os km 54+500 e 47, com 7,5 quilômetros de extensão e rampa máxima com 13% de inclinação, sendo esses 2 trechos os principais candidatos a implantação da área de escape quanto a esse critério.

4.3.2 Alinhamento Horizontal: Curvas

No que se refere ao alinhamento horizontal da rodovia, é importante construir áreas de escape antes das curvas horizontais que podem provocar o tombamento de veículos desgovernados devido ao excesso de velocidade (AASHTO, 2018). Levantadas no *software "Google Earth Pro (2024)"* e ilustradas na Figura 23, estão as curvas horizontais de maior impacto do trecho de estudo, onde foram enumeradas de acordo com a ordem crescente dos marcos quilométricos da rodovia.

Figura 23 - Curvas horizontais da rodovia BR-050 entre o km 39 e 64.



Fonte: Autor (2024) adaptado de *Google Earth Pro* (2024).

Conforme apresentado anteriormente, um dos critérios críticos a serem analisados é a velocidade de tombamento nas curvas horizontais, que no caso deste estudo e no seu cálculo, estão diretamente relacionadas ao comprimento do raio de curvatura, uma vez que a velocidade diretriz de todo o trecho é praticamente uniforme. Dito isso, quão menor for o raio da curva, menor será a velocidade de tombamento de um veículo nela e, portanto, quão menor essa velocidade for, mais crítica é a curva horizontal.

Tabela 8 - Localização e raio das curvas horizontais da rodovia BR-050 entre o km 39 e 64.

Curva Horizontal	Raio (m)	Localização
1	660	41 + 450
2	225	47 + 450
3	240	48 + 200
4	600	49 + 100
5	840	51 + 350
6	200	52 + 225
7	150	53 + 050
8	220	53 + 400
9	180	54 + 030
10	250	54 + 550
11	210	55 + 690
12	190	56 + 180
13	490	57 + 000
14	700	59 + 530
15	300	60 + 650

Fonte: Autor adaptado de *Google Earth Pro* (2024).

Através dos dados presente na Tabela 8 é possível analisar que as curvas mais críticas do trecho em estudo são as curvas 7, 9 e 12 com raios de curvatura em metros de 150, 180 e 190 respectivamente. Diante do exposto e analisando a localização dessas curvas, no que se refere a esse critério de escolha da localização da rampa de escape, o trecho crítico se encontra entre os km 52 e 56. Além disso, é importante considerar que o dispositivo da área de escape deve ser implantado antecedendo uma dessas curvas, uma vez que são nelas que o veículo desgovernado tende a ultrapassar a velocidade de tombamento resultando em algum sinistro rodoviário.

4.4 Impacto Ambiental, Econômico e Área de Implantação

Segundo os critérios técnicos analisados até então para a escolha do local de implantação da área de escape, é possível delimitar um ponto crítico mais assertivo que abranja o maior número desses critérios. Através da determinação desse ponto, o estudo de escolha da área de implantação do dispositivo propriamente dito é feito, e junto a ele, as análises dos critérios ambientais e econômicos. Isso se dá, pois a escolha da área de implantação está diretamente

relacionada aos impactos ambientais gerados pela obra e operação desse dispositivo, assim como os custos principalmente relacionados à movimentação de terra que a construção desse dispositivo gera. Diante disso, a Tabela 9 explicita a combinação desses trechos críticos visando auxiliar a escolha desse ponto crítico mais específico.

Tabela 9 - Trechos críticos segundos os critérios técnicos analisados.

Cr critrio	Localiza o o Trecho Cr itico (Km)
Hist rrico de Acidentalidade	54+000 ao 59+000
Alinhamento Vertical (Rampas)	47+000 ao 61+000
Alinhamento Horizontal (Curvas)	53+000 ao 56+000

Fonte: Autor, (2024).

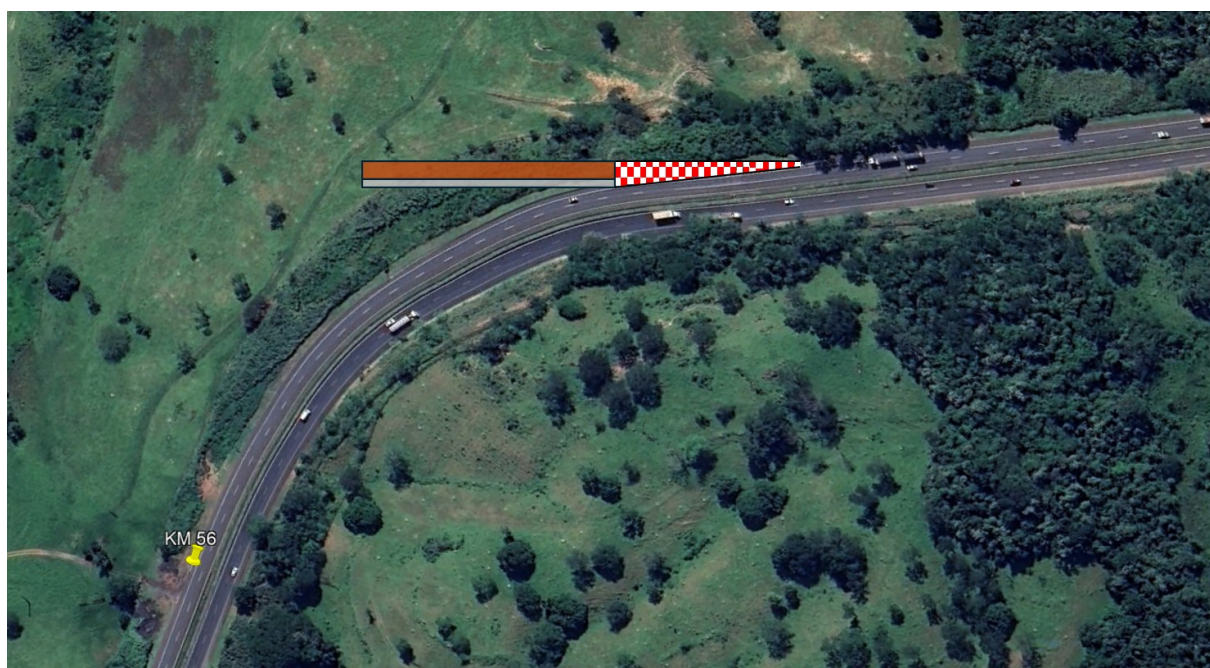
Segundo a Tabela 9 acima, é poss vel delimitar o ponto mais cr itico como o trecho entre o km 54 e 56. No que se refere a escolha da rea espec fica para implanta o o da rea de escape, conforme explicitado no estudo das curvas horizontais, é importante que a rea esteja localizada antes das curvas com raio de curvatura menor. Diante disso, uma possibilidade de localiza o o no sentido de deslocamento norte (sentido mais cr itico segundo o hist rrico de sinistralidade) seria na tangente da curva horizontal 12 (km 56+180). Isso se deve ao fato de que essa rea oferece boas condi o oes topogr ficas e espa o suficiente para as dimens o oes do dispositivo, exigindo assim um menor custo de implanta o o com obras e opera o o, al m de propiciar um menor impacto ambiental segundo o desn vel da sua se o o transversal. Al m disso, é importante destacar a condi o o topogr fica favor vel do local em rela o o a sinistros que possam envolver vazamentos de produtos perigosos, que podem causar um grande impacto ambiental. Isso se deve ao fato de a inclina o o do terreno neste ponto ser no sentido contr rrio ao do rio Araguari, evitando assim poss veis contamina o oes ambientais nessa rea. Com a rea de escape a ser implantada do lado direito da via, posi o o ideal, e o acesso a caixa de reten o o constr uida na tangente da curva, o que facilita a entrada e sa da segura dos ve culos desgovernados e dos ve culos de opera o o e manuten o o, conforme ilustrado na Figura 24 e Figura 25 a representa o o visual do dispositivo.

Figura 24 - Curva horizontal km 56+180.



Fonte: Autor, (2024).

Figura 25 - Representação visual em planta do dispositivo na curva do km 56+180.



Fonte: Autor, (2024).

5 RESULTADOS - PROJETO FUNCIONAL

Conforme mencionado neste trabalho, um dos seus objetivos é propor um projeto funcional da área de escape no ponto crítico determinado pelos estudos realizados nos capítulos anteriores. É importante que esse projeto seja viável de implantação e operação, além de atender

todas as recomendações normativas e órgãos vigentes. Quanto às determinações referentes a sinalização horizontal e vertical, estas também obedeceram às recomendações normativas e poderão ser visualizadas no Anexo A, juntamente com todas as outras características do projeto funcional.

5.1 Dimensionamento

Para efeito de dimensionamento, como não existem delimitações específicas no que se refere a normas técnicas para dispositivos de área de escape, foram respeitadas as recomendações de projeto do manual da AASHTO (2018) intitulado *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, referente ao ano de 2018, que explicita:

- Para parar com segurança um veículo descontrolado, o comprimento da rampa deve ser suficiente para dissipar a energia cinética do veículo em movimento;
- O alinhamento da rampa de escape deve ser tangente ou em curvatura bem plana para minimizar a dificuldade do motorista em controlar o veículo;
- A largura da rampa deve ser adequada para acomodar mais de um veículo, porque não é incomum que dois ou mais veículos precisem da rampa de escape em um curto espaço de tempo. Embora uma largura mínima de 8 metros possa ser o máximo viável em algumas áreas, larguras maiores são preferíveis. Desejavelmente, uma largura de 9 a 12 m acomodaria mais adequadamente dois ou mais veículos fora de controle. Larguras de rampa menores do que as indicadas acima foram usadas com sucesso em alguns locais onde foi determinado que uma largura maior era excessivamente cara ou desnecessária. As larguras das rampas em uso variam de 3,6 a 12 m;
- O material de superfície usado no leito da caixa de retenção deve ser limpo, não facilmente compactado e ter um alto coeficiente de resistência ao rolamento. Quando o agregado é usado, ele deve ser arredondado, não triturado, predominantemente de um único tamanho e tão livre de material de tamanho fino quanto possível. Esse material maximiza a porcentagem de vazios, proporcionando assim drenagem ideal e minimizando o intertravamento e a compactação. Um material com baixa resistência ao cisalhamento é desejável para permitir a penetração dos pneus. A durabilidade do agregado deve ser avaliada usando um teste de esmagamento apropriado;

- Os leitos de proteção devem ser construídos com uma profundidade mínima agregada de 1 m. A contaminação do material da cama de retenção pode reduzir a sua eficácia, criando uma camada de superfície dura de até 300 mm de espessura na parte inferior da caixa. Portanto, uma profundidade de agregado de 100 mm é recomendada. Conforme o veículo entra na caixa de retenção, as rodas do veículo deslocam a superfície, afundando no material, aumentando assim a resistência ao rolamento. Para auxiliar na desaceleração suave do veículo, a profundidade do leito deve ser afunilada de um mínimo de 75 mm no ponto de entrada até a profundidade total do agregado nos 30 a 60 m iniciais da caixa, formando uma rampa em declive suave;
- Uma inclinação na base da caixa deve ser fornecida para evitar a contaminação do material utilizado no leito da superfície de contenção. Isso pode ser feito nivelando a base para drenar, interceptando a água antes de entrar no leito, sistemas de drenagem inferior com saídas transversais ou drenos de borda. Geotêxteis ou pavimentação podem ser usados entre o sub- materiais da base e do leito para evitar infiltração de materiais finos que podem reter água. Onde a contaminação tóxica de óleo diesel ou outro derramamento de material é uma preocupação, a base do leito da superfície (ou cama) pode ser pavimentada com concreto e tanques de retenção para reter os contaminantes derramados que podem ser fornecidos;
- A entrada da rampa deve ser projetada para que um veículo viajando em alta velocidade possa entrar com segurança. Deve ser fornecida a maior distância de visibilidade possível antes da rampa para que o motorista possa entrar com segurança. O comprimento total da rampa deve ser visível para o motorista. O ângulo de saída da rampa deve ser pequeno, geralmente 5 graus ou menos. Uma faixa auxiliar pode ser apropriada para auxiliar o motorista a se preparar para entrar na rampa de escape. A superfície da estrada principal deve ser estendida além do canal de saída para que ambas as rodas dianteiras do veículo fora de controle entrem na plataforma de proteção simultaneamente; isso também fornece tempo de preparação para o motorista antes que a desaceleração real comece. A plataforma de proteção deve ser deslocada lateralmente das faixas de rolamento por uma quantidade suficiente para impedir que material solto seja lançado nas faixas de rolamento da rodovia;
- A característica que torna uma rampa de escape de caminhão eficaz também dificulta a recuperação de um veículo capturado pela rampa. Uma pista de serviço operacional localizada adjacente à caixa de retenção é necessária para que caminhões de reboque e

veículos de manutenção possam utilizá-la sem ficarem presos no material utilizado na superfície. A largura desta pista de serviço deve ser de pelo menos 3 m. De preferência, esta estrada de serviço deve ser pavimentada, mas pode ser revestida com cascalho, onde deve ser projetada de tal forma que o motorista de um veículo fora de controle não confunda a pista de serviço com a cama de frenagem.

- Pórticos geralmente localizadas adjacentes à caixa da área de escape em intervalos de 50 a 100 m, são necessárias para prender um caminhão de reboque ao remover um veículo da cama de retenção. Uma âncora deve ser localizada cerca de 30 m à frente da cama para auxiliar o guincho a retornar um veículo capturado para uma estrada pavimentada. Os operadores locais de caminhão de reboque podem ser muito úteis para localizar corretamente as âncoras.

Ainda, segundo o manual americano da AASHTO (2018), para permitir que o motorista inspecione o veículo e verificar se os freios não estão superaquecidos antes de iniciar a descida, áreas de parada obrigatória ou de verificação de freios podem ser utilizadas no topo de uma rampa. Essas áreas podem incluir um acostamento alargado ou uma faixa pavimentada separada do acostamento onde caminhões podem parar. Uma sinalização apropriada deve ser instalada para evitar paradas casuais por outros usuários. Informações sobre a localização das rampas de escape e detalhes da rampa à frente podem ser fornecidas por panfletos de autoatendimento ou sinalização diagramática, onde não se faz necessário um projeto sofisticado para essas áreas.

5.1.1 Caixa de retenção

Conforme mencionado anteriormente, as caixas de retenção podem ser projetadas com qualquer inclinação, uma vez que não dependem somente da força da rampa para imobilizar o veículo. Diante disso, tem-se o dimensionamento do comprimento, largura e profundidade da caixa de retenção a seguir, levando em consideração as características topográficas do local onde vai ser implantada, conforme recomendações da AASHTO (2018).

5.1.2 Material na superfície da caixa de retenção

No que se refere ao material agregado utilizado na superfície da caixa de retenção, será considerada a cinasita, comercialmente conhecida como argila expandida. Isso se deve ao fato

dela corresponder a todos os critérios apontados pela AASHTO (2018) nas recomendações explicitadas acima quanto ao material e sua alta resistência de rolamento. Baseando-se na consistência e similaridade, foi feita uma aproximação dos valores do coeficiente de rolamento dos materiais, conforme o estudo de Witheford (1992). Para a argila expandida, foi adotado o mesmo coeficiente do cascalho arredondado, equivalente a 0,25.

O uso de argila expandida é tecnicamente viável, pois é um material economicamente acessível e oferece benefícios técnicos significativos. Por ser não inflamável, contribui para aumentar a resistência ao fogo, especialmente em função das altas temperaturas geradas pelo motor de veículos pesados durante as frenagens. Além disso, o material proporciona isolamento térmico e acústico, enquanto reduz a sobrecarga em estruturas, tornando-se uma solução eficiente em diversas aplicações (SILVA, 2022).

Sempre que utilizados, as caixas de contenção de agregados devem ser restauradas, preferencialmente, com o uso de equipamentos elétricos, evitando-se a entrada humana na caixa. O agregado deve ser escarificado quando necessário, uma vez que, com o passar do tempo, o material tende a compactar. É essencial remover contaminantes do material da caixa e realizar escarificações periódicas para preservar suas propriedades de desaceleração e garantir uma drenagem eficiente. Além disso, a manutenção dos componentes acessórios como as âncoras e pórticos de retirada de caminhões devem ser efetuadas conforme necessário. O uso de equipamentos elétricos para a manutenção do leito de contenção diminui o tempo de exposição dos trabalhadores ao risco de um possível uso emergencial por caminhões desgovernados (AASHTO, 2018).

5.1.3 Comprimento

A combinação da resistência externa e de inúmeras forças de resistência interna atuam para limitar a velocidade máxima de um veículo fora de controle. Como na caixa de retenção o veículo desgovernado encontrará a superfície preenchida por um material resistente ao rolamento, sua velocidade será reduzida rapidamente. Diante disso, a velocidade de entrada na curva de estudo considerada será de 90 km/h, sendo que a velocidade de projeto do local é de 60 km/h devido a um radar redutor de velocidade posicionado antes da curva atualmente. Segundo o perfil de elevação ilustrado na Figura 22, a declividade da rampa no trecho crítico definido é de aproximadamente 4%.

De acordo com os dados obtidos para o dimensionamento da área de escape referente à curva escolhida, tem-se os seguintes dados:

- Velocidade de entrada (V) = 90 km/h;
- Resistência de rolamento da cinasita (R)= 0,25;
- Porcentagem da inclinação da rampa no local (G) = - 0,04;

Para calcular a distância necessária para que o veículo pare, levando em consideração a resistência ao rolamento e a resistência do declive, pode-se utilizar a seguinte equação simplificada (AASHTO, 2018):

$$L = \frac{V^2}{254 (R + G)}$$

Onde tem-se:

L = comprimento da caixa de retenção;

V = velocidade de entrada (km/h);

R = resistência ao rolamento;

G = porcentagem da inclinação dividida por 100;

$$L = \frac{90^2}{254 (0,25 - 0,04)} = 151,86 \text{ m}$$

Como padrão, será utilizado o comprimento de 150 m, para a dimensão principal do dispositivo de retenção da área de escape.

5.1.4 Largura

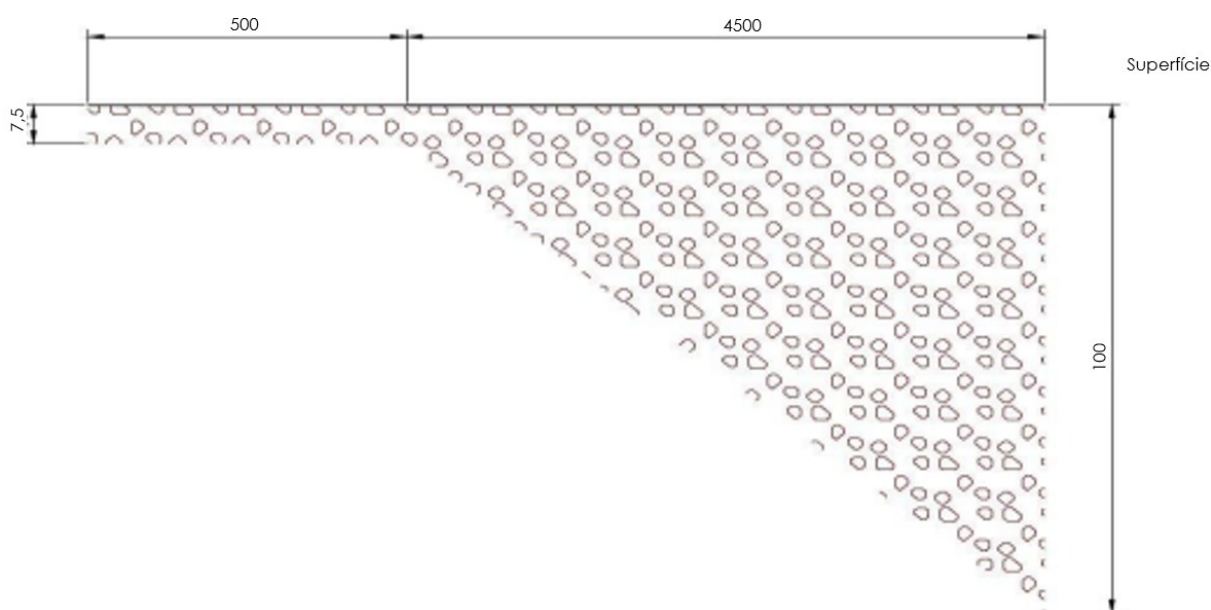
Seguindo as recomendações da norma norte-americana (AASHTO, 2018), a largura da rampa deve ser adequada para acomodar mais de um veículo, porque é comum que dois ou mais veículos precisem da rampa de escape em um curto espaço de tempo. Portanto a largura adotada será a de 8 metros.

5.1.5 Profundidade

Conforme as diretrizes da AASHTO (2018), é recomendado que a caixa apresente uma profundidade mínima de 7,5 cm no seu ponto de entrada. Nos primeiros 30 a 60 metros, essa

profundidade aumenta gradualmente até atingir 100 cm. Para a caixa de retenção proposta no projeto funcional, a profundidade dos 5 metros iniciais é de 7,5 centímetros, dos próximos 45 metros propõe-se um aumento gradual até os 100 centímetros de profundidade, que se estende até o final da caixa. A Figura 26 apresenta um esquema ilustrativo do perfil de profundidade para o modelo adotado.

Figura 26 - Perfil longitudinal dos 50 metros iniciais da caixa de retenção adaptada das recomendações AASHTO.



Fonte: Autor (2024).

5.2 Projeto de sinalização

Após a elaboração do projeto funcional da caixa de retenção da área de escape, foram propostas novas sinalizações verticais e horizontais ao longo do trecho que a antecede, com o objetivo de aumentar a segurança no percurso até o leito. A seguir, são apresentadas as propostas de sinalização para o projeto com toda sua descrição e embasamento normativo. O detalhamento completo, incluindo as sinalizações previstas, encontra-se no Anexo A.

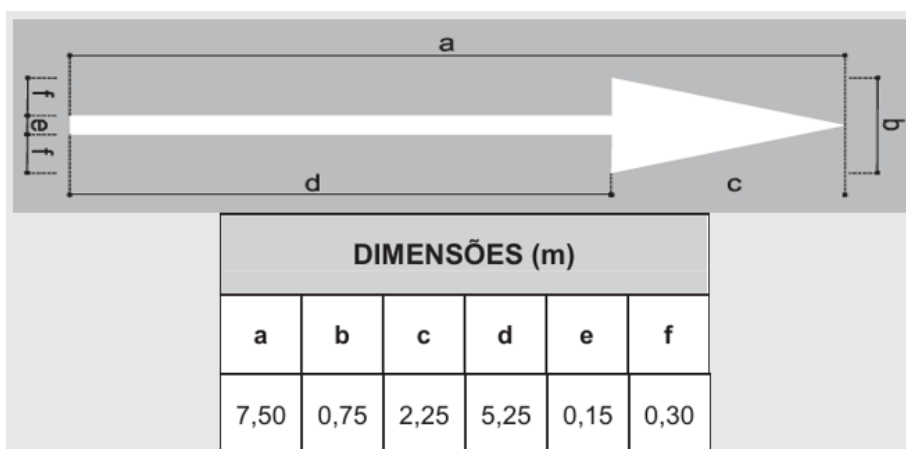
Devido a carência de normas técnicas brasileiras quanto a sinalização de dispositivos de área de escape, foram levadas em consideração sugestões feitas pelo manual norte-americano da AASHTO (2018), porém sem desprezar as diretrizes normativas de sinalização brasileiras do CONTRAN. Em seu manual “*Policy on Geometric Design of Highways and Streets*” a AASHTO considera: O acesso à rampa deve ser claramente indicado por sinalização de saída para permitir que o motorista de um veículo fora de controle tenha tempo para reagir, para

minimizar a possibilidade de perder a rampa. A sinalização antecipada é necessária para informar os motoristas sobre a existência de uma rampa de escape e para prepará-los bem antes do ponto de decisão, para que tenham tempo suficiente para decidir se devem ou não usar a rampa de escape. Placas regulamentares perto da entrada devem ser usadas para desencorajar outros motoristas de entrar, parar ou estacionar na rampa ou sobre ela. O caminho da rampa deve ser delineado para definir as bordas da rampa e fornecer direção noturna, com a iluminação da sinalização e da rampa em sendo desejável. Além disso, vale destacar que as sinalizações propostas no projeto funcional também se basearam na sinalização existente da área de escape da BR-376, km 675 sentido sul.

5.2.1 Sinalização Horizontal

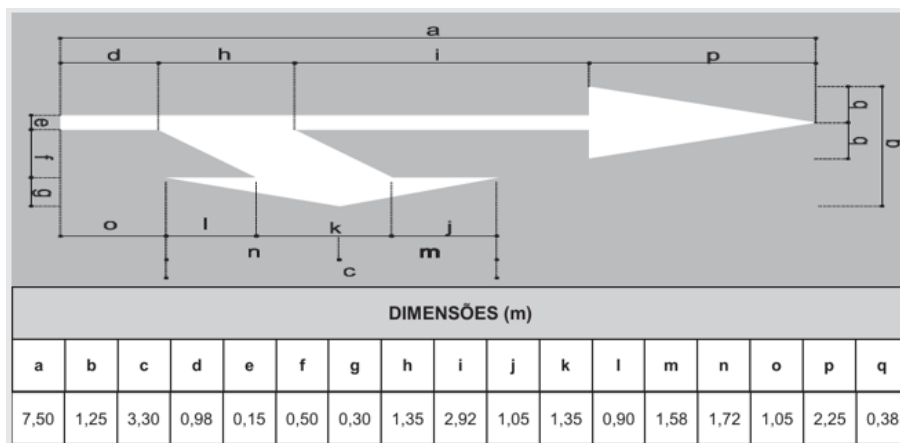
Em todo o local de estudo foi projetada a sinalização horizontal de acordo com o Manual de Sinalização Horizontal do CONTRAN (2022). Para o trajeto da rodovia BR-050 até a entrada da área de escape foram projetadas setas indicativas de posicionamento na pista para execução de movimentos (PEM). Dois tipos de PEM foram projetadas, a “Siga em frente” na pista de rolamento da esquerda, e a “Siga em frente ou vire à direita” na pista de rolamento da direita. A segunda visa orientar os usuários que pretendem adentrar na área de escape a permanecerem na pista da direita, evitando possíveis conflitos. Suas dimensões foram adotadas seguindo o Manual de Sinalização Horizontal do CONTRAN (2022), que relaciona a velocidade da via com as dimensões da seta. Assim, na Figura 27 e 28 são apresentadas suas dimensões.

Figura 27 – Dimensões da seta PEM “Siga em frente” do projeto.



Fonte: Adaptado de CONTRAN (2022).

Figura 28 – Dimensões da seta PEM “Siga em frente ou vire à direita” do projeto.



Fonte: Adaptado de CONTRAN (2022).

Referente a vias rurais e a velocidade de projeto regulamentada no local, também se descreve a localização e distâncias das setas PEM no local de estudo conforme ilustrado na Tabela 10 (CONTRAN, 2022), onde: d1 – distância entre a primeira e a segunda fileira de PEM; d2 – distância entre a segunda e a terceira fileira de PEM.

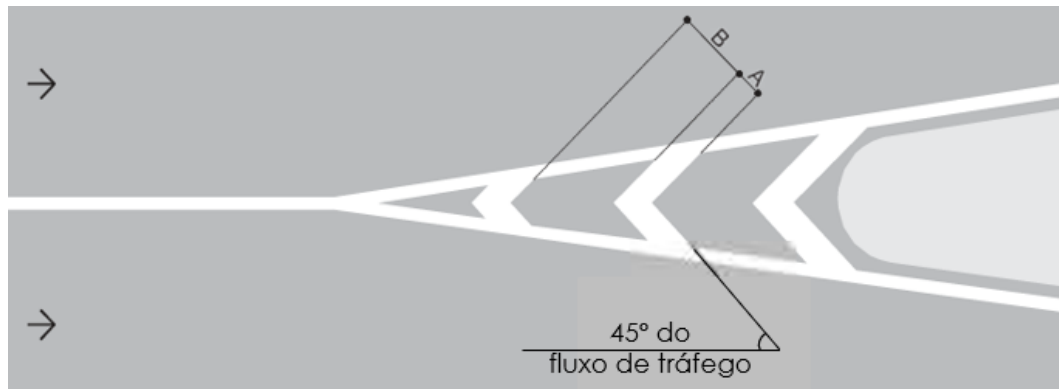
Tabela 10 – Distâncias regulamentadas das setas PEM.

VELOCIDADE REGULAMENTADA (km/h)	DISTÂNCIA (m)		COMPRIMENTO DA SETA (m)
	d=d1	d2	
$60 \leq v \leq 80$	40	60	7,50

Fonte: Adaptado de CONTRAN (2022).

Para a canalização de divisão entre os fluxos de entrada na área de escape e de permanência do deslocamento na rodovia, foi utilizado o zebrado de preenchimento de área de pavimento não utilizável (ZPA), com dimensões das faixas respeitando a margem estabelecida pelo CONTRAN (2022), conforme ilustrado na Figura 29 e Tabela 11.

Figura 29 – Disposição linhas ZPA proposto no projeto.



Fonte: Adaptado de CONTRAN (2022).

Tabela 11 – Dimensões regulamentadas das linhas ZPA.

DIMENSÕES	CIRCULAÇÃO	ÁREA DE PROTEÇÃO DE ESTACIONAMENTO
Largura da linha interna A	mínima 0,30 m	mínima 0,10 m
	máxima 0,50 m	máxima 0,40 m
Distância entre linhas B	mínima 1,10 m	mínima 0,30 m
	máxima 3,50 m	máxima 0,60 m

Fonte: CONTRAN (2022).

Referente ao acostamento que antecede a área de escape, é importante uma sinalização horizontal que impeça a parada de veículos no local, o que poderia comprometer a entrada do veículo desgovernado na área de escape e gerar um grande risco a segurança dos usuários envolvidos. Para isso, foram utilizadas linhas de marcação de áreas de pavimento não utilizáveis (MAN) respeitando as dimensões da Tabela 11, conforme proposto pelo CONTRAN (2022) e ilustrado pelo DER-SP (2023) na Figura 30.

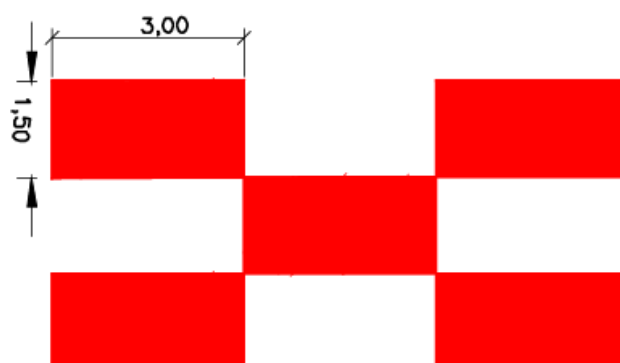
Figura 30 – Disposição linhas MAN proposto no projeto.



Fonte: DER/SP (2023).

Segundo SETRA (1993, *apud* Zanoli, 2003), a sinalização horizontal da entrada para a caixa de retenção deve ser distinta de uma saída convencional, utilizando um padrão de xadrez nas cores vermelha e branca para destacar o acesso à área de escape no entroncamento com a rodovia. A sinalização xadrez proposta no projeto funcional é ilustrada na Figura 31.

Figura 31 – Disposição linhas MAN proposto no projeto.



Fonte: Autopista Litoral Sul (2011).

5.2.2 Sinalização Vertical

No que se refere a sinalização vertical relacionada a áreas de escape para caminhões desgovernados do projeto funcional, foram consideradas as recomendações do “*U.S Department of Transportation*”, em português, Departamento de Transporte dos Estados Unidos, que apresenta suas diretrizes pelo “*Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways 11th Edition*” (MUTCD). Segundo o MUTCD (2023), as recomendações quanto a sinalização vertical são:

- Onde aplicável, as placas de advertência antecipada para rampas de escape para caminhões desgovernados devem ser posicionadas aproximadamente a 1 milha e ½ milha (1,6 km e 0,8 km respectivamente) antes da rampa de escape, além de uma placa adicional no entroncamento da entrada do dispositivo com a rodovia.
- Uma placa "RUNAWAY VEHICLES ONLY" deve ser instalada próxima à entrada da rampa, assim como sinalização de “Proibido Estacionar” visando desencorajar outros usuários da via de acessá-la.
- Órgãos estaduais e locais de rodovias podem desenvolver placas com mensagens escritas apropriadas para a situação específica.

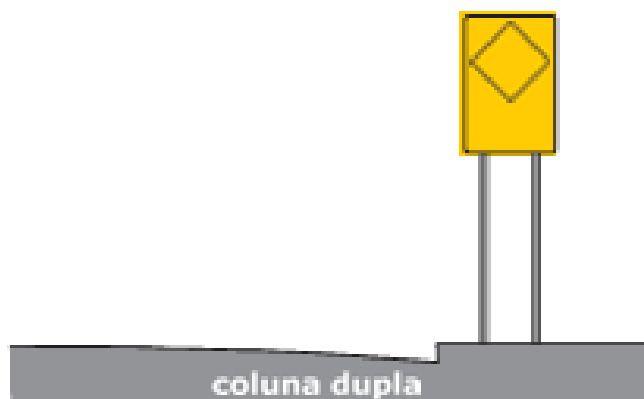
Diante das considerações do MUTCD, as implantações referentes a sinalização vertical no projeto funcional foram adaptadas as diretrizes brasileiras do CONTRAN. As sinalizações de advertência ao usuário sobre a existência e localização do dispositivo são ilustradas na Figura 32, sendo propostas placas semelhantes a 1500 m, 1000 m, 500 m, 200 m e na entrada da área. É importante destacar que essas placas respeitam todas as diretrizes do Manual Brasileiro de Sinalização Vertical de Advertência do CONTRAN (2022), desde as dimensões e cores da placa, conforme ilustrado na Tabela 12 e Tabela 13 respectivamente, como também nós padrões alfanuméricos e de retrorefletividade e iluminação. Além disso, o suporte das placas utilizado para o projeto é o de coluna dupla, conforme ilustrado pela Figura 33, podendo ser de aço ou madeira imunizado (CONTRAN, 2022).

Figura 32 – Sinalização Vertical de advertência da localização da área de escape.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2024).

Figura 33 – Suporte de placas tipo coluna dupla utilizado no projeto funcional.



Fonte: CONTRAN (2022).

Tabela 12 – Dimensões mínimas da Sinalização Vertical Especial de Advertência.

Via	Lado maior mínimo (m)	Lado menor mínimo (m)	Orla externa mínima (m)	Orla interna mínima (m)
Urbana	0,500	0,250	0,005	0,010
Rural (estrada)	0,800	0,400	0,008	0,016
Rural (rodovia)	1,000	0,500	0,010	0,020
Áreas protegidas por legislação especial(*)	0,400	0,200	0,006	0,012

Fonte: CONTRAN (2022).

Tabela 13 – Características da Sinalização Vertical Especial de Advertência.

Cor	
Fundo	Amarela
Símbolo	Preta
Orla interna (opcional)	Preta
Orla externa	Amarela
Tarja	Preta
Legenda	Preta

Fonte: CONTRAN (2022).

Quanto a sinalização vertical de regulamentação as dimensões dos sinais também são definidas de acordo com o tipo de via. Portanto, as placas e dimensões recomendadas para essas sinalizações de forma circular são apresentadas na Tabela 14 e Tabela 15 respectivamente, com exceção da placa R-6c que foi implantada em conjunto com a sinalização vertical especial de advertência, conforme ilustrado na Figura 34.

Tabela 14 – Sinalizações verticais de regulamentação utilizadas no projeto.

Sinal	Código	Nome	Local de implantação no projeto funcional
	R-6c	Proibido parar e estacionar	Entrada da área de escape
	R-27	Ônibus, caminhões e veículos de grande porte mantenham-se à direita	A 1.500 m da entrada da área de escape

Fonte: Autor (2024).

Tabela 15 – Dimensões recomendadas para os sinais de regulamentação de forma circular.

Via	Diâmetro (m)	Tarja (m)	Orla (m)
Urbana (de trânsito rápido)	0,75	0,075	0,075
Urbana (demais vias)	0,50	0,050	0,050
Rural (estrada)	0,75	0,075	0,075
Rural (rodovia)	1,00	0,100	0,100

Fonte: CONTRAN (2022).

Figura 34 – Disposição em conjunto de placa especial de advertência e R-6c.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2024).

No projeto funcional também foram propostas sinalizações verticais de indicação do tipo educativas e orientação, dimensionadas conforme o Manual Brasileiro de Sinalização Vertical de Indicação do CONTRAN (2022). Conforme ilustrado na Figura 35, foi proposto uma placa de indicação de confirmação de saída em conjunto com uma placa de advertência 35 metros antecedendo a entrada da área de escape, visando orientar os usuários à entrada do dispositivo.

Figura 35 – Disposição em conjunto de placa indicativa e advertência da área de escape.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2024).

No que se refere as placas de indicação do tipo educativas, foram propostas duas placas com as legendas “Verifique os freios” e “Use o freio motor. É mais seguro” antecedendo a área de escape, conforme ilustrado na Figura 36 e Figura 37 respectivamente. A primeira visa orientar principalmente os usuários de caminhões a checar o funcionamento de seus freios, sendo possível assim identificar uma pane mecânico no sistema de frenagem antes da área de escape. A segunda estimula o uso do freio motor por parte dos caminhoneiros, visando diminuir as chances de superaquecimento do sistema de freios por alta solicitação. Ambas as placas foram dimensionadas com legendas com letras maiúsculas maiores que 150 mm, conforme diretrizes do CONTRAN (2022) para vias rurais, além disso seguem as orientações de cores ilustradas na Tabela 16.

Tabela 16 – Forma e cores para placas de indicação educativas.

Forma	Elemento	Cor
Retangular	Fundo	Branca
	Orla interna	Preta
	Orla externa	Branca
	Tarja	Preta
	Legendas	Preta
	Pictograma	Preta

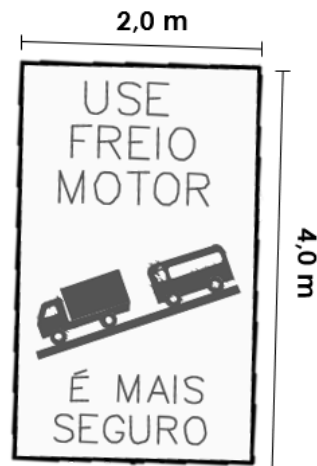
Fonte: CONTRAN (2022).

Figura 36 – Placa 1 de indicação educativa proposta no projeto funcional.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2024).

Figura 37 – Placa 2 de indicação educativa proposta no projeto funcional.



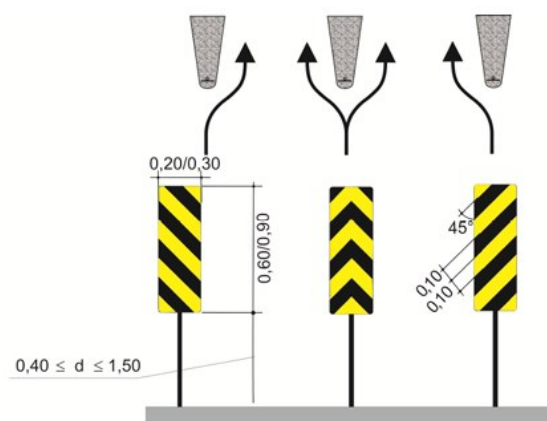
Fonte: Adaptado pelo Autor (2024).

5.2.3 Dispositivos Auxiliares

O uso dos dispositivos auxiliares no projeto funcional da área de escape se restringe ao marcador de perigo MP-3, utilizado seguindo as diretrizes do Manual Brasileiro de Sinalização de Dispositivos Auxiliares do CONTRAN (2022), e das barreiras rígidas de concreto segundo a norma ABNT 14885 (2016).

Conforme determinado pelo CONTRAN (2022), as dimensões e disposição do marcador de perigo MP-3, na Figura 38 localizado no meio, são as ilustradas. Este foi utilizado na intenção de auxiliar a sinalização horizontal ZPA canalização do fluxo de veículos.

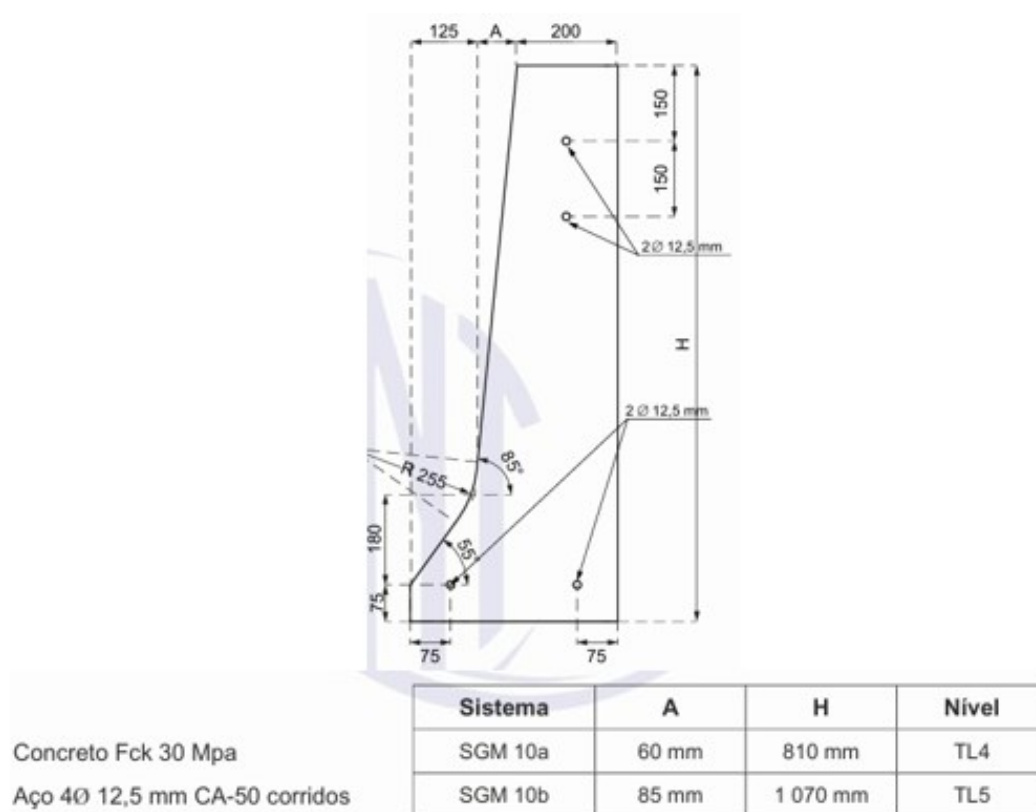
Figura 38 – Dimensões do marcador de perigo MP-3 utilizado no projeto funcional.



Fonte: CONTRAN (2022).

Quanto as barreiras rígidas de concreto, foram propostas na entrada da área de escape no lado direito, e ao longo de toda a caixa de retenção em ambos os lados. No lado direito, localizada ao longo da margem da caixa de retenção, e no lado esquerdo ao longo da margem esquerda da pista de operação e manutenção. Esses dispositivos visam impedir possíveis saídas de pistas que possam ocorrer aos veículos que não conseguiram se alinhar corretamente a direção da entrada da caixa de retenção, evitando possíveis quedas e choques contra os taludes laterais de aterro. Diretrizes expostas pela norma ABNT 14885 (2016) foram seguidas para a barreira rígida do tipo simples proposta no projeto funcional, conforme modelo com dimensões ilustrado na Figura 39 (sistema SGM 10b). Outras diretrizes que devem ser respeitadas são: instalação de atenuadores de impacto nos terminais da barreira (início); delinear o alinhamento da face interna das barreiras com elementos refletivos; material de construção sendo o concreto armado de fck mínimo no valor de 25 Mpa; e ancoragem das barreiras através de fundação direta.

Figura 39 – Barreira rígida do tipo simples proposta no projeto funcional.



Fonte: ANBT (2016).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados referentes a um estudo dos critérios técnicos para escolha da necessidade de implantação e posteriormente escolha da melhor localização de uma área de escape na rodovia BR-050, trecho entre os municípios de Araguari e Uberlândia, no estado de Minas Gerais. Os resultados obtidos neste estudo podem servir como base para o desenvolvimento de novos dispositivos de contenção ou como diretrizes para aprimorar os métodos de análise dos critérios de projeto e de estudo de critérios técnicos referente a localização de áreas de escape. Além disso, as revisões bibliográficas reforçam a importância da realização de pesquisas futuras sobre o tema, considerando que alguns aspectos ainda possuem potencial para serem mais aprofundados e explorados.

Com o levantamento da bibliografia técnica na área de sistema de frenagem de caminhões, destaca-se o fato de que esses dispositivos de segurança viária, as áreas de escape, são possíveis medidas corretivas para a problemática do superaquecimento do sistema de freio dos caminhões em rodovias, e não preventivas. Isso se deve a práticas consideradas erradas usuais nas rodovias brasileiras, como a falta da manutenção periódica dos sistemas mecânicos dos caminhões, assim como o transporte de cargas acima das permitidas pelos órgãos regulamentadores.

Junto a isso, a revisão da bibliografia referente ao estudo dos critérios técnicos levados em consideração para a tomada de decisão de implantação de uma área de escape e a escolha da localização desse dispositivo é vasta. Com diferentes trabalhos técnicos realizados em diversas nacionalidades, os critérios julgados mais importantes estão presentes em grande parte das pesquisas. Destacam-se quatro: o estudo do histórico de sinistralidade dos locais críticos; o comprimento e porcentagem de inclinação da rampa do trecho; o volume de tráfego e velocidade de projeto; e por fim o julgamento dos profissionais de engenharia. Devido a variedade dessas pesquisas, optou-se pelas recomendações dos diversos Departamentos de Transportes Estaduais americanos (DOTs), pelo respaldo de qualidade técnica e atualidade das informações. Este trabalho apresentou os resultados relacionados com os critérios de projeto de áreas de escape com caixa de retenção e um estudo de operação dos veículos pesados em declives.

Por meio deste trabalho, foi possível realizar uma análise crítica dos problemas geométricos de rodovias no Brasil e uma das possíveis soluções que podem ser adotadas para mitigar os efeitos negativos que esses problemas podem gerar sobre a ocorrência de sinistros graves. É importante destacar que as áreas de escape podem ser consideradas uma alternativa

viável, mas somente após esgotadas todas as possibilidades de correção geométrica da via. É recomendado que outras soluções de engenharia sejam avaliadas tecnicamente, permitindo uma comparação direta com a implementação de áreas de escape, especialmente em trechos de pistas descendentes de serra com rampas acentuadas, onde há elevado índice de sinistros e mortes devido à falha no sistema de freios. Sugere-se que o estudo comparativo inclua, no mínimo, três alternativas de soluções de engenharia, analisadas tanto de forma isolada quanto combinada, para fundamentar a escolha da opção mais adequada.

Diante do exposto, a presente pesquisa, composta pelo trabalho escrito em conjunto com a planta do projeto funcional, evidencia a relevância do desenvolvimento de estudos técnicos conduzidos com seriedade na área da engenharia rodoviária. Por meio de uma revisão da literatura, seguida da proposição de um estudo de caso, este trabalho põe em pauta a área da segurança viária e sua principal meta: a redução e prevenção de sinistros rodoviários, buscando aumentar a segurança do usuário e sua qualidade de vida.

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros tanto na área de critérios para escolha do local de implantação como na área de projetos de áreas de escape no contexto nacional, recomenda-se:

- Conforme apresentado na análise do histórico de sinistralidade, o sentido de deslocamento sul também apresenta um histórico de sinistros envolvendo falhas mecânicas devido a perda de freios. Portanto, sugere-se a realização de estudos referentes à implantação de uma outra área de escape, destacando-se o km 54.
- A influência real da massa do veículo na intensidade da desaceleração na caixa de retenção é um ponto que merece análise. Para investigar essa relação com maior precisão, recomenda-se realizar ensaios que variem a massa do mesmo caminhão, permitindo, assim, constatar de forma mais exata a conexão entre a massa e a desaceleração.
- Referente à análise dos critérios técnicos para a escolha do local de implantação, a análise de cada situação por parte da equipe de engenharia é essencial, uma vez que cada meio tem suas particularidades e subjetividades. Contudo, recomenda-se uma futura padronização normativa desses critérios visando uma maior facilidade no acesso a este tipo de informação, que ainda é bastante precária no contexto nacional.

- Para a execução de um projeto de engenharia, torna-se essencial desenvolver os projetos complementares. Nesse contexto, recomenda-se aprofundar os estudos relacionados à elaboração dos projetos de viabilidade econômica. Esses estudos devem considerar a análise de indicadores de desempenho, como o Valor Presente Líquido (VPL), o índice Benefício/Custo (B/C), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de retorno (*Payback*), bem como avaliar suas respectivas implicações.
- Continuidade dos estudos por meio de ferramentas que avaliem o risco de sinistros, como o “*Roadside Impact Severity Calculation*”, ou RISC, (Austroads, 2010), que determinam a probabilidade de um veículo sair da pista e a severidade das consequências caso isso ocorra, além de calcular a frequência de colisões com objetos fixos (em saídas de pista) e os custos envolvidos, com base na severidade provável dos impactos.

O RISC auxilia na avaliação econômica das diferentes alternativas de mitigação de risco, por meio de um software que compara os benefícios e os custos relativos de diversas opções de tratamento, facilitando a identificação da solução mais eficiente para cada perigo. As etapas sugeridas para aplicação incluem:

1. Determinação da frequência de colisões com objetos fixos.
 2. Cálculo dos custos anuais dos sinistros com base na severidade dos impactos.
 3. Comparação entre os custos e os benefícios das opções de tratamento, para identificação da solução mais econômica.
 4. Análise dos resultados para definição dos benefícios estimados, junto ao monitoramento das soluções propostas.
- Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de um estudo mais aprofundado no que se refere a sinalização e as considerações de projetos de áreas de escape, também buscando uma futura padronização normativa desses dispositivos de segurança viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. O.; SILVA, R. R; NEGRI, R. Análise comparativa do aumento na segurança dos usuários da rodovia BR-376/PR com a implantação das áreas de escape. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v., n. 1, p. 1-10, 2022.

AASHTO (2011) American Association of State Highway and Transportation Officials. Roadside Design Guide (4ª edição). Washington D. C., Estados Unidos.

AASHTO (2018) AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. AASHTO, Washington, D.C.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14885: Segurança no tráfego: Barreiras de concreto**. Rio de Janeiro. 2016.

AUSTROADS (2010) Guide to Road Safety Part 6: Road Safety Audit. Austroads Publication No AGRS06/09. Sydney, Austrália.

CANALE, A.C. (1989). Automobilística: dinâmica e desempenho. São Paulo, Érica. Cap. 5, p.78-99: Dinâmica da Frenagem.

CNT (2018) Confederação Nacional dos Transportes. Rodovias: colisões são responsáveis pela maior parte dos acidentes com vítimas. Agência CNT Transporte Atual. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/colisoes-acidentes-vitimas-rodovias-federais>. Acesso em: 28 jan. 2025.

COBREQ (2002) Fabricante de pastilhas e lonas de freios. Informações técnicas. Características essenciais das lonas e pastilhas de freio. Disponível em: <<https://tmdcobreq.com.br/>>.

CNT (2019) CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Acidentes Rodoviários: Estatísticas Envolvendo Caminhões. Brasília: 2019.

CNT (2023) CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Painel CNT de Acidentes Rodoviários - Principais dados 2023. Brasília: 2023.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 882/21: Dispõe sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos. Conselho Nacional de Trânsito, Ministério da Justiça do Brasil, Brasília, DF.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume I: Sinalização Vertical de Regulamentação. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), 2022.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume II: Sinalização Vertical de Advertência. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), 2022.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume III: Sinalização Vertical de Indicação. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), 2022.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume IV: Sinalização Horizontal. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), 2022.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume VI: Sinalização Semafórica. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), 2022.

Department of Transportation. *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. 11th ed. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 2023.

FERNANDES, J. S. Sistemas de Freio Veicular: Manual NAKATA para Sistemas de Freios. São Paulo (SP), USP, 2017.

HENRIQUE, T. R. Tipos de áreas de escape. *Revista Engenharia de Obras*, ed. 4, p. 10-45, v. (3), 2019.

LIMPERT, P. R. Importância da Manutenção em Sistemas de Freios e a Sua Manutenção. Ribeirão Preto (SP), UFRP, 2016. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ribeirão Preto (SP), 2016.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (2022) Selection and Placement Guidelines for Test Level 2 Through Test Level 5 Median Barriers. Washington, DC: The National Academies Press. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/26679>. Acesso em: 28 jan. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Promovendo a defesa da segurança viária e das vítimas de lesões causadas pelo trânsito: um guia para organizações não governamentais. Brasil: 2021.

Portal do Trânsito (2024) Dados oficiais confirmam que volta a crescer o número de mortes no trânsito brasileiro. Portal do Trânsito, Mobilidade e Sustentabilidade. Disponível em: <https://www.portaldotransito.com.br/noticias/fiscalizacao-e-legislacao/estatisticas/dados-oficiais-confirmam-que-volta-a-crescer-o-numero-de-mortes-no-transito-brasileiro/>. Acesso em: 28 jan. 2025.

SILVA, R. A. Estudo de eficiência das áreas de escape e seu impacto na queda da acidentalidade relacionada a transporte de cargas pesadas: estudo de caso ERS-431. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Souto, Thales. (2013). Produção de cana-de-açúcar na Mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil. *Brazilian Geographical Journal*. 4. 27-54.

WITHEFORD, D. K., CUNAGIN, W. D., American Association of State Highway and Transportation Officials., & United States. Federal Highway Administration. (1992). Truck escape ramps. Transportation Research Board, National Research Council.

ZANOLI, P. R. (2003). Área de escape para caminhões desgovernados. São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo <https://doi.org/10.11606/D.18.2003.tde-08042014-084813>