



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

ALISON KAIOS DANTAS PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A GEOMETRIA DA VIA E A
INFRAESTRUTURA DO PAVIMENTO POR MEIO DA OBTENÇÃO DO PADRÃO
DE CONDUÇÃO VEICULAR EM CURVAS**

FORTALEZA

2024

ALISON KAIQ DANTAS PEREIRA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A GEOMETRIA DA VIA E A
INFRAESTRUTURA DO PAVIMENTO POR MEIO DA OBTENÇÃO DO PADRÃO DE
CONDUÇÃO VEICULAR EM CURVAS

Documento da Dissertação apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Transportes da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Transportes. Área de
concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Verônica TF Castelo
Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P489a Pereira, Alison Kaio Dantas.
AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A GEOMETRIA DA VIA E A INFRAESTRUTURA DO
PAVIMENTO POR MEIO DA OBTENÇÃO DO PADRÃO DE CONDUÇÃO VEICULAR EM CURVAS /
Alison Kaio Dantas Pereira. – 2024.
132 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Projeto geométrico de rodovias. 2. Raios de curvas horizontais. 3. Segurança viária. 4. Condição da
superfície. 5. Padrão de Condução. I. Título.

CDD 388

ALISON KAIQ DANTAS PEREIRA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A INFRAESTRUTURA DO PAVIMENTO E A
SEGURANÇA VIÁRIA POR MEIO DA OBTENÇÃO DO PADRÃO DE CONDUÇÃO
VEICULAR EM CURVAS

Documento da Dissertação apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Transportes da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Transportes. Área de
concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Verônica TF Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Flávio José Cunto, Ph.D. (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Ana Paula Larocca, Ph.D. (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Wellington Lorran. (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer às pessoas que estão comigo desde o meu nascimento, acompanhando meu crescimento e incentivando, de forma incansável, todos os meus sonhos: ao meu pai, Francisco, e à minha mãe, Célia. Infelizmente, hoje meu pai não está aqui e não pôde acompanhar minha história, mas, com certeza, ele está orgulhoso deste momento.

Meu agradecimento às minhas irmãs, Aline e Alane, por todo o apoio oferecido. À minha namorada, por todo o empenho e apoio que tem me oferecido em todos os momentos da minha vida. Ela foi essencial para que tudo isso acontecesse.

À minha orientadora, professora Verônica Castelo Branco. Sua paciência, conhecimento e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Sua contribuição foi significativa e merece meu profundo agradecimento.

Ao professor Lorran Ferreira, cujos ensinamentos e empenho foram essenciais para o progresso desta pesquisa. Além disso, suas contribuições foram valiosas para o meu crescimento.

Meu muito obrigado à Verônica e ao Lorran. Tornaram-se amigos com quem pude compartilhar momentos de aprendizado e descontração ao longo desse tempo.

Ao Programa PETRAN, pelo acolhimento de todos que o fazem acontecer: professores, técnicos administrativos e terceirizados. Vocês são fundamentais.

Aos meus colegas José Levi, Sebastian, Breno, Camila e Victor Cardoso, agradeço por todos os momentos compartilhados, sejam eles bons ou difíceis, pois todos foram parte deste processo.

Por fim, agradeço aos membros da banca examinadora pelo interesse e pelas valiosas contribuições oferecidas.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Segundo a Organização Mundial da Saúde, cerca de 1,19 milhão de pessoas foram vítimas de sinistros de trânsito no mundo, em 2021. No Brasil, entre 2013 e 2022, aconteceram aproximadamente 866 mil sinistros nas rodovias federais, com cerca de 23% das ocorrências registradas em curvas horizontais. Os dados oficiais indicam que o comportamento inadequado do motorista é o fator principal para a causa dos sinistros. No entanto, pesquisas mostram que os aspectos ambientais, a condição da superfície e os parâmetros geométricos da via podem interferir na forma da condução veicular e, consequentemente, na ocorrência dos sinistros. Este estudo investiga a relação entre a geometria da via, o padrão de condução do motorista e a infraestrutura viária, por meio da análise do comportamento dos motoristas em curvas. Para atingir o objetivo proposto, foram avaliados sinistros de trânsito ocorridos em curvas horizontais de uma rodovia no estado do Rio Grande do Norte (RN), e selecionadas seis curvas com raios entre 100 e 500 metros. Os raios das curvas e as inclinações longitudinais foram aferidos por meio de levantamento planialtimétrico cinemático com o *GNSS TOPCON GRS-1*. Além disso, foram coletados dados com um sistema embarcado equipado com sensores *GPS* e acelerômetros para aferir a geolocalização, velocidades e acelerações dos veículos. Cinco condutores realizaram 30 viagens em cada curva (15 em cada sentido da via). Em seguida, avaliou-se o coeficiente de atrito da curva mais crítica utilizando técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI). Como resultado, este estudo constatou que as intensidades das desacelerações para curvas relativamente planas tendem a ser superiores às demais e esse comportamento pode estar relacionado aos sinistros. Além disso, os condutores tendem a realizar direção mais defensiva em curvas com inclinações longitudinais acima de 3,5% e apresentam maiores ajustes de velocidade. As investigações da aceleração transversal mostraram que esse parâmetro é importante para compreender o padrão de condução do motorista, e ele, aparentemente, não é afetado pela inclinação da via. Curvas de raio entre 100 e 200 metros tem acelerações transversais superiores às demais, embora a velocidade seja inferior. Por fim, foi constatado que o coeficiente de atrito é inferior no interior da curva em comparação às tangentes, esse fato pode indicar que a aceleração transversal pode ter impacto importante no desgaste do pavimento e merece ser vista com atenção.

Palavras-chave: Projeto geométrico de rodovias; Raios de curvas horizontais; Segurança viária; Condição da superfície; Padrão de Condução.

ABSTRACT

According to the World Health Organization, approximately 1.19 million people were victims of traffic accidents worldwide in 2021. In Brazil, between 2013 and 2022, approximately 866,000 accidents occurred on federal highways, with about 23% of these incidents recorded on horizontal curves. Official data indicates that improper driver behavior is the primary cause of these accidents. However, research shows that environmental factors, surface conditions, and geometric parameters of the road can influence driving behavior and, consequently, the occurrence of accidents. This study investigates the relationship between road geometry, driver behavior, and roadway infrastructure by analyzing driver behavior on curves. To achieve the proposed objective, traffic accidents on horizontal curves of a highway in the state of Rio Grande do Norte (RN) were evaluated, and six curves with radii between 100 and 500 meters were selected. The radii of the curves and the longitudinal inclinations were measured using kinematic planimetric surveying with the GNSS TOPCON GRS-1. Additionally, data were collected using an onboard system equipped with GPS sensors and accelerometers to measure vehicle geolocation, speeds, and accelerations. Five drivers performed 30 trips on each curve (15 in each direction of the road). Subsequently, the friction coefficient of the most critical curve was evaluated using digital image processing (DIP) techniques. As a result, this study found that deceleration intensities for relatively flat curves tend to be higher than for others, and this behavior may be related to accidents. Furthermore, drivers tend to adopt more defensive driving in curves with longitudinal inclinations above 3.5% and make greater speed adjustments. Investigations into lateral acceleration showed that this parameter is important for understanding driver behavior, and it appears not to be affected by road inclination. Curves with radii between 100-200 meters have higher lateral accelerations than others, although speeds are lower. Finally, it was found that the friction coefficient is lower inside the curve compared to the tangents, which may indicate that lateral acceleration could have a significant impact on pavement wear and deserves closer attention.

Keywords: Geometric design of highways; Radius of horizontal curves; Road safety; Surface condition; Driving pattern.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise dos principais autores que publicam sobre projeto geométrico de rodovias e segurança viária (palavras-chave: <i>road safety AND geometric design AND design consistency AND horizontal curves</i>).....	22
Figura 2 - Principais palavras-chave citadas pelos estudos sobre projeto geométrico de rodovias e segurança viária.	23
Figura 3 - Análise dos principais autores da que publicam sobre projeto geométrico de rodovias e segurança viária (palavras-chave: <i>road safety AND geometric design AND horizontal curve AND driving simulation</i>).	24
Figura 4 – Análise dos principais autores que publicam sobre condição de superfície e segurança viária (palavras-chave: <i>traffic safety AND friction AND horizontal curves</i>).....	26
Figura 5 - Recorte dos autores que pesquisam sobre a relação entre condição de superfície e segurança viária.	26
Figura 6 - Palavras-chave dos estudos que envolvem projeto geométrico de rodovias, condição de superfície e segurança viária.....	28
Figura 7 - Forças que atuam sobre o veículo em curva circular.....	31
Figura 8 - Superelevação em curva horizontal.	35
Figura 9 - Superelevação de acordo com algumas normas internacionais	37
Figura 10 - Limites de raios mínimos (m) de curvas horizontais para 4% de superelevação ..	38
Figura 11 - Limites de raios mínimos (m) de curvas horizontais para 6% de superelevação ..	38
Figura 12 - Limites de raios mínimos (m) de curvas horizontais para 8% de superelevação ..	39
Figura 13 - Curva horizontal a) simples e b) com espiral de transição.	40
Figura 14 - Elementos de projeto tridimensionais da concordância entre curva horizontal e vertical.	41
Figura 15 - Elementos recomendados para o alinhamento do projeto geométrico.	42
Figura 16 - Faixas de textura para superfície de pavimentos.	47
Figura 17 - Forças de atrito envolvidas na rotação do pneu.....	49
Figura 18 – Representação da captura de uma imagem utilizando fotogrametria.....	53
Figura 19 – Método de análise <i>CRP</i>	54
Figura 20 - Coeficiente de atrito adotado em alguns países no mundo	56
Figura 21 - Curva horizontal reversas (curva em S).	58
Figura 22 - Trajetória realizada pelo condutor. a) trajetória ideal e b) desvio da trajetória ideal	59
Figura 23 - Esboço de uma curva vertical.	60

Figura 24 - Relação entre o conforto do motorista e raio de curva.....	63
Figura 25 - Exemplo de comportamento de direção em curvas horizontais.....	64
Figura 26 - Exemplo de dispositivo para coleta do deslocamento nos três eixos.....	66
Figura 27 - Exemplo de gráfico com dados adquiridos do acelerômetro.....	67
Figura 28 - Modelo experimental e curva da via para o modelo proposto.....	68
Figura 29 - Etapas metodológicas do estudo.....	70
Figura 30 – Localização do estado do Rio Grande do Norte e os sinistros nas rodovias federais entre 2017 e 2022.....	71
Figura 31 - Trecho da rodovia BR-427 – descrição da área do estudo de caso.....	72
Figura 32 - Fluxograma de aquisição dos dados.....	73
Figura 33 - Fluxograma de filtragem dos dados.....	73
Figura 34 - Análise temporal dos sinistros de trânsito em curvas na BR-427.....	74
Figura 35 - Sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, por dia da semana, entre os anos de 2013 e 2022.....	74
Figura 36 - Sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, entre os anos de 2013 e 2022, por fase do dia e condições climáticas.....	75
Figura 37 - Causas dos sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, entre os anos de 2013 e 2022.....	76
Figura 38 - Tipos dos sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, entre os anos de 2013 e 2022.....	76
Figura 39 - Classes de raios horizontais do trecho da BR-427.....	78
Figura 40 - Classe de tangentes do trecho da BR-427.....	78
Figura 41 - Frequência de raios de curvas horizontais e sinistros no trecho da BR-427.....	79
Figura 42 - Mapa de declividade da área de estudo	80
Figura 43 - Sinistros na BR-427, entre 2013 e 2022, no trecho entre Caicó e Jardim do Seridó, por classes de raio.....	81
Figura 44 - Curvas horizontais C9, C14, C23, C28, C41 e C42 da BR-427, entre Caicó e Jardim do Seridó.....	82
Figura 45 - Curvas da BR-427 da classe a) 100 a 200 m (C28 e C41), b) 200 a 300 m (C9 e C14) e c) 400 a 500 m (C23 e C42).....	82
Figura 46 - GNSS TOPCON GRS-1 acoplado ao veículo.....	84
Figura 47 - Dispositivo embarcado acoplado ao veículo.....	85
Figura 48 - Esboço da estrutura do dispositivo embarcado.....	86
Figura 49 - Validação dos sensores GPS e acelerômetro do dispositivo embarcado.....	87

Figura 50 – Esboço de um modelo de curva dividida em sete zonas.	89
Figura 51 – Velocidade e aceleração transversal na curva C2, sentido D.	89
Figura 52 – Método para tratamento dos dados e divisão das zonas.	90
Figura 53 – Etapas metodológicas para avaliação do conforto do motorista.	91
Figura 54 - Pontos de análise dos coeficientes de atrito em curvas.	92
Figura 55 - Etapas para obtenção dos parâmetros superficiais do pavimento.	93
Figura 56 - Perfis longitudinais das curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 da BR-427.	94
Figura 57 - Matriz de inclinações longitudinais das curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6.	95
Figura 58 - Matriz das velocidades médias para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 nos sentidos D e E.	96
Figura 59 - Velocidades médias dos condutores nas curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6, nos sentidos Direito (D) e Esquerdo (E).	96
Figura 60 – Máximas, mínimas e variação das velocidades para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6.	97
Figura 61 - Velocidades e inclinações longitudinais das curvas C3 e C4.	98
Figura 62 - Linha de tendência e coeficientes angulares das velocidades para a curva C3, sentido E.	100
Figura 63 - Matriz de coeficientes angulares da velocidade para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 nos sentidos D e E.	101
Figura 64 - Coeficientes angulares da velocidade e as inclinações longitudinais para as curvas de raios C1 e C2, sentidos D e E.	102
Figura 65 - Coeficientes angulares da velocidade e as inclinações longitudinais para as curvas de raios C3 e C4, sentidos D e E.	103
Figura 66 - Matriz de acelerações transversais para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 nos sentidos D e E.	105
Figura 67 - Acelerações transversais dos condutores nas curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6, no sentido a) à direita D e b) à esquerda E.	106
Figura 68 - Inclinações longitudinais e acelerações transversais das curvas C3 e C4.	107
Figura 69 - Acelerações transversais, coeficientes angulares das velocidades e inclinações longitudinais para as curvas C1 e C2.	108
Figura 70 - Acelerações transversais e velocidades para as curvas C1 e C2.	109
Figura 71 - Análise da constância das velocidades das zonas Z3, Z4 e Z5 para as curvas C1, C2, C4, C5 e C6 de acordo com as janelas flutuantes de 5, 10, 15 e 20m.	111

Figura 72 - Limites de acelerações transversais em janelas de velocidades constantes para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6.....	113
Figura 73 - Limite de conforto da aceleração transversal em curvas de raio entre 100 e 500 m.....	114
Figura 74 - Parâmetros da macrotextura da superfície do pavimento da curva C2.....	116
Figura 75 - Parâmetros da microtextura da superfície do pavimento da curva C2.	116
Figura 76 - Inclinação longitudinal da curva C2.	117
Figura 77 - Atrito da superfície do pavimento da curva C2.	118
Figura 78 - Coeficiente angular da aceleração, aceleração transversal e coeficiente de atrito da superfície da curva C2.	119
Figura 79 - Dispersão do coeficiente angular da velocidade, aceleração transversal e coeficiente de atrito da curva C2.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidades diretrizes em função da classe de projeto e do relevo.....	32
Tabela 2 - Raios mínimos (m) em função da superelevação máxima (%) e velocidade operacional (km/h).....	34
Tabela 3 - Valores máximos recomendados de superelevação (%).	35
Tabela 4 - Valores de raio (m) acima dos quais a superelevação é dispensável.....	36
Tabela 5 - Máximos coeficientes de atrito transversal admissíveis.....	36
Tabela 6 – Dispositivos para medição do coeficiente de atrito.	52
Tabela 7 - Rampas máximas (%) de acordo com o relevo.	60
Tabela 8 - Descrição das curvas da C28, C41, C9, C14, C23 e C42 da BR-427	84
Tabela 9 – Descrição das curvas da BR-427 selecionadas para o estudo.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Autores utilizados na pesquisa de projeto geométrico e segurança viária.	24
Quadro 2 - Autores utilizados na pesquisa de condição de superfície e segurança viária.	27
Quadro 3 - Principais estudos identificados na revisão sistemática da presente pesquisa.	29
Quadro 4 - Classes de projeto de acordo com as características.	33
Quadro 5 - Parâmetros de textura da norma ISO 25178-2 (2012).....	47
Quadro 6 - Parâmetros de textura da superfície obtidos na curva crítica.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AASHTO</i>	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
<i>ANTT</i>	Agência Nacional de Transportes Terrestres
<i>CNT</i>	Confederação Nacional do Transporte
<i>CRP</i>	<i>Close-Range Photogrammetry</i>
<i>DER</i>	Departamento de Estradas de Rodagem
<i>DNER</i>	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
<i>DNIT</i>	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
<i>FHWA</i>	<i>Federal Highway Administration</i>
<i>GNSS</i>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>HCM</i>	<i>Highway Capacity Manual</i>
<i>HSIS</i>	Sistema de Informações de Segurança Viária
<i>IFI</i>	<i>International Friction Index</i>
<i>IRAP</i>	<i>International Road Assessment Programme</i>
<i>NDS</i>	Dados de Direção Naturalista, em inglês...
<i>ONSV</i>	Observatório Nacional de Segurança Viária
<i>PRE</i>	Polícia Rodoviária Estadual
<i>RHD</i>	<i>Roads & Highways Department</i>
<i>RN</i>	Rio Grande do Norte
<i>RS</i>	Revisão Sistemática
<i>RTK</i>	<i>Real Time Clock</i>
<i>SANRAL</i>	<i>South African National Roads Agency Limited</i>
<i>TAC</i>	<i>Transportation Association of Canada</i>
<i>WHO</i>	<i>World Health Organization</i>
<i>WSDOT</i>	Departamento de Transporte do Estado de Washington, em inglês....

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.2.	Problema de Pesquisa.....	18
1.3.	Objetivo Geral.....	18
1.3.1.	Objetivos Específicos	18
1.4.	Estrutura do Documento.....	19
2.	REVISÃO SISTEMÁTICA	21
2.1.	Projeto Geométrico de Rodovias e Segurança Viária	21
2.2.	Condição de Superfície e Segurança Viária	25
2.3.	Interação entre as Temáticas e Resumo dos Estudos	27
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1.	Elementos do Projeto Geométrico.....	31
3.1.1.	Velocidade Diretriz e Ocorrência de Sinistros	32
3.2.	Método da Visão Zero, Sistemas Seguros e Rodovias que Perdoam	44
3.3.	Interação Pneu-Pavimento.....	46
3.3.1.	Condição da Superfície e Sinistros de Trânsito	46
3.3.2.	Atritos Longitudinal e Transversal	51
3.4.	Influência da Condição da Superfície, Curvas e Concordâncias nos Sinistros....	55
3.5.	Utilização de Sistemas Embarcados para Avaliação da Segurança Viária.....	66
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	70
4.1.	Definição da Rodovia.....	71
4.2.	Caracterização dos Sinistros de Trânsito e Trecho em Estudo	72
4.2.1.	Caracterização dos Sinistros de Trânsito	74
4.2.2.	Definição das Curvas Horizontais e Tangentes de Aproximação.....	77
4.3.	Análise das Curvas Horizontais e Tangentes de Aproximação	83
4.3.1.	Levantamento Planialtimétrico dos Trechos do Estudo	84
4.3.2.	Avaliação da Trajetória, Acelerações e Velocidade dos Veículos	85
4.3.3.	Definição das Coletas, Nomenclaturas do Estudo e Zonas de Análise	87
4.3.4.	Avaliação do Conforto do Motorista	90
4.3.5.	Análise dos Parâmetros Superficiais do Pavimento	92
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
5.1.	Análise da Geometria da Via e Velocidade do Condutor	94

5.2.	Intensidade da Variação da Velocidade, Inclinações Longitudinais e Raio de Curva.....	100
5.3.	Efeito da Geometria da Via e Velocidade do Condutor na Aceleração Transversal.....	105
5.4.	Análise do Conforto do Motorista em Curvas Horizontais	111
5.5.	Impacto do Padrão de Condução na Superfície do Pavimento	115
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
6.1.	Considerações Finais	122
6.2.	Recomendações para Trabalhos Futuros	124
	REFERÊNCIAS	125

1. INTRODUÇÃO

O relatório global de segurança viária, produzido pela *World Health Organization (WHO, 2023)*, demonstra que a média de mortes nas estradas no mundo foi de 1,19 milhão de pessoas no ano de 2021. Nas Américas, a taxa de mortes em sinistros de trânsito, no mesmo período, foi de 15 para cada 100.000 habitantes. No Brasil, de acordo com dados oficiais, cerca de 866 mil sinistros ocorreram nas rodovias federais brasileiras entre 2013 e 2022, tendo o Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV, 2023) revelado que, somente no ano de 2021, ocorreram 33.813 mortes nos sinistros de trânsito, sendo cerca de 17 mortes a cada 100.000 habitantes.

Apesar disso, de acordo com uma pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022), no Brasil, cerca de 74,7% das rodovias federais são classificadas como boas ou regulares no que se refere ao seu estado de conservação. No que diz respeito à geometria das vias, a CNT relata que aproximadamente 62,6% estão categorizadas como boas ou regulares. Ainda segundo a CNT, o número de sinistros é cinco vezes mais frequente em rodovias consideradas em péssimas condições em comparação com aquelas em ótimas condições. A complexidade e a diversidade das variáveis envolvidas nos sinistros, que vão de condicionantes humanas, ambientais, até condição da superfície do pavimento, tornam esse nicho de estudo abrangente e complexo (Rondora; Pirdavani; Larocca, 2022).

Apesar da vasta possibilidade de estudos, investigações dos sinistros por órgãos competentes mencionam, majoritariamente, o comportamento inadequado do condutor como a principal causa dos mesmos (Lima *et al.*, 2008). Em contrapartida, pesquisadores têm avançado no estudo de outras variáveis relacionadas aos parâmetros geométricos da via, considerando aspectos como por exemplo os parâmetros da geometria da via (Chen *et al.*, 2018; Wang; Wang, 2018; Choudhari; Maji, 2019; Rondora; Pirdavani; Larocca, 2022). Esses autores observaram que raios de curvas horizontais inferiores a 150 m (aproximadamente) podem ocasionar uma mudança brusca na trajetória do veículo, com consequente variação da velocidade. Estas ações, por parte do condutor, são características de um traçado geométrico não homogêneo, que podem estar relacionadas aos sinistros de trânsito e as mudanças no padrão de condução. Cafiso *et al.* (2020) afirmam que o projeto geométrico de rodovias – associado à condição de superfície do pavimento e a relação com o padrão de condução é uma lacuna a ser pesquisada.

Neste estudo, o padrão de condução será tratado como o ato de realizar um percurso com uma trajetória desejada (ou projetada e esperada) por parte do condutor. A variação da velocidade também será tratada como parte do padrão de condução. Essas mudanças podem ser ocasionadas por diversos fatores, como curvas fora dos parâmetros geométricos de segurança, alinhamentos horizontais e verticais projetados equivocadamente e coeficientes de atrito insuficientes para promover segurança ao longo do trajeto.

Neste sentido, a consistência do projeto geométrico (ou traçado homogêneo) é considerada satisfatória quando a maioria dos condutores mantêm padrões uniformes de direção ao longo da via, transitando entre os elementos do projeto geométrico de forma suave e previsível, sem mudança repentina na velocidade e no comportamento. Nessa perspectiva, estudos buscam compreender como a geometria da via está relacionada ao comportamento do condutor e como esse fato reflete em possíveis sinistros de trânsito (Tanishita; Wee, 2017; Santos; Oliveira; Larocca, 2022). Além disso, investiga-se, também, a condição da superfície como fator contribuinte para a falta de segurança nas estradas (Buddhavarapu *et al.*, 2013; Xie *et al.*, 2019). Aspectos como coeficiente de atrito e seus impactos no padrão de condução são normalmente avaliados. No entanto, esses estudos, relacionados à geometria da via, ainda apresentam lacunas, haja vista a não consideração de outras variáveis, como a mudança do atrito ao longo de um determinado elemento geométrico da via (Cafiso *et al.* (2020).

A trajetória ideal de um veículo pode ser deduzida, hipoteticamente, como a trajetória realizada na faixa de rolamento, sem variações laterais. O desvio da faixa de rolamento pode ser um indicativo de pontos no traçado geométrico mais favoráveis à ocorrência de sinistros. Sendo assim, comprehende-se que investigar como os elementos geométricos, as condições superficiais da via e a variação de velocidade estão envolvidas na variação da trajetória ideal, por parte do condutor, é importante para minimizar a ocorrência de sinistros em pontos críticos do traçado. Diante disso, este trabalho justifica-se pela necessidade de compreender como os aspectos geométricos (curvas, superelevação e inclinações longitudinais e transversais) e os parâmetros superficiais (atraito longitudinal e transversal) do pavimento influenciam no padrão de condução do motorista (variação de trajetória e velocidade), e, consequentemente, na segurança viária.

1.2. Problema de Pesquisa

A literatura aponta para o entendimento de que o comportamento do motorista (incluindo o desvio de trajetória e a variação da velocidade ao longo de um trecho) pode estar associado a diversas questões, tais como as degradações da superfície, modificações das propriedades mecânicas e superficiais das camadas de rolamento (incluindo atrito longitudinal e transversal) e também a ocorrência de sinistros de trânsito. Em outra perspectiva, há avanço na literatura associando os sinistros aos parâmetros geométricos da via, como curvas horizontais e inclinações. No entanto, devido à complexidade das análises, a maioria dos estudos investiga os parâmetros geométricos da via, relacionando-os à condição da superfície, por meio do uso de simuladores de direção. As pesquisas realizadas por meio de simuladores, embora importantes, podem não representar fielmente situações reais, que envolvem desde variações nas propriedades de atrito do pavimento até a trajetória imposta pelo motorista em decorrência da percepção em campo. Com isso, surgem alguns questionamentos que ainda não foram completamente explicados pela literatura.

- a. De que maneira os raios de curvas horizontais, inclinações longitudinais e concordância de curvas podem influenciar a velocidade do condutor?
- b. Os aspectos geométricos da via podem explicar alterações na trajetória, na velocidade e nas acelerações do condutor?
- c. O comportamento do condutor, influenciado pela geometria da via, afeta o coeficiente de atrito do pavimento?

1.3. Objetivo Geral

Investigar a relação entre a geometria da via e a infraestrutura do pavimento por meio da obtenção da condução veicular em curvas.

1.3.1. Objetivos Específicos

- a. Analisar a influência dos raios das curvas, das inclinações da via e da concordância das curvas nos perfis de velocidades dos condutores;
- b. Investigar a relação entre o comportamento do condutor e as características geométricas da via;
- c. Verificar como os aspectos geométricos da via e da condução veicular influenciam o coeficiente de atrito da superfície.

1.4. Estrutura do Documento

Este documento está dividido em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução a respeito da temática, os termos e os conceitos relevantes para entender o nicho do estudo. Em seguida, são apresentados os problemas que justificam a investigação e os objetivos almejados nesta pesquisa. O Capítulo 2 mostra a sistematização da revisão bibliométrica, como o estudo foi guiado e os principais autores que pesquisam a temática. O Capítulo 3 é dedicado à revisão bibliográfica do estudo, que está subdividida em 5 subtópicos:

3.1 - Elementos do Projeto Geométrico: A finalidade do subtópico é mostrar os principais parâmetros das normas e manuais de projeto geométrico do mundo, com foco no Brasil.

3.2 - Método da Visão Zero, Sistemas Seguros e Rodovias que Perdoam: esse subtópico traz conceitos sobre as abordagem Visão Zero, Sistemas Seguros e Rodovias que Perdoam.

3.3 - Interação Pneu-Pavimento: Além dos aspectos de projeto geométrico, a interação entre o pneu-pavimento também impacta na segurança viária. O subtópico 3.3 é dedicado a mostrar como estas variáveis influenciam nos sinistros de trânsito. Além disso, uma possível lacuna de pesquisa é sugerida relacionando projeto geométrico e interação pneu-pavimento;

3.4 - Influência da Condição da Superfície, Curvas e Concordâncias nos Sinistros: A partir do estudo relacionado ao projeto geométrico e à interação pneu-pavimento, o subtópico abordará temas relacionados à influência das curvas, concordância entre curvas e velocidade nos sinistros de trânsito, além de tratar como estes aspectos interagem entre si diminuindo a segurança viária;

3.5 - Utilização de Sistemas Embarcados para Avaliação da Segurança Viária: A finalidade do subtópico é mostrar como os sistemas embarcados estão auxiliando na compreensão dos problemas relacionados a condução veicular, e como essa metodologia pode auxiliar no desenvolvimento desta pesquisa.

O Capítulo 4 é dedicado aos Materiais e Métodos utilizados na pesquisa. Nele, são descritas as rodovias utilizadas no estudo de caso, a análise dos sinistros de trânsito e a determinação dos pontos críticos. Posteriormente, é mostrado como o levantamento dos trechos serão realizados, como as trajetórias dos veículos serão avaliadas e em quais pontos das rodovias os coeficientes de atrito serão levantados.

O Capítulo 5 é dedicado aos resultados do estudo e está dividido em cinco subtópicos: análise da geometria da via e velocidade do condutor; intensidade da variação da velocidade, inclinações longitudinais e raio de curva; efeito da geometria da via e velocidade do condutor na aceleração transversal; análise do conforto do motorista em curvas horizontais e impacto do padrão de condução na superfície do pavimento.

No Capítulo 6, são mostradas as conclusões do estudo e está dividido em três subtópicos, de acordo com as questões da pesquisa. Além disso, esse Capítulo apresenta as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA

A Revisão Sistemática (RS) da literatura a respeito da temática do estudo é um processo importante para fundamentar e identificar questões e métodos de pesquisa. A RS envolve um planejamento focado em uma estratégia detalhada e abrangente da pesquisa, com o objetivo de identificar os estudos relevantes sobre um determinado tema por meio da identificação, avaliação e síntese minuciosa (Uman, 2011). A partir da análise crítica dos resultados, é possível sintetizar vários estudos, informar a teoria, a pesquisa e a prática utilizadas na pesquisa, com o objetivo de identificar lacunas do conhecimento científico. Cumming, Bettini e Chow (2023) afirmam que os principais princípios da RS são: i) enquadrar o problema e as questões de pesquisa, ii) planejar procedimentos para identificar, analisar e sintetizar estudos e iii) apresentar e interpretar os resultados.

A RS antecede a revisão (pré-revisão). Esta contempla a identificação de razões para a revisão, formulações de questões e estratégias de pesquisa. O processo de RS da literatura possui quatro etapas: seleção dos estudos primários por meio de similaridade de palavras-chave e conteúdo relevante para a pesquisa; avaliação da relevância e cobertura dos estudos; aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e, por fim, avaliação e análise dos estudos selecionados (Slebodnik; Pardon; Hermer, 2022; Kanwal; Muram; Javed, 2024). Devido a abrangência da investigação, a RS desta pesquisa foi dividida em duas grandes áreas:

- Projeto geométrico de rodovias e segurança viária;
- Condição de superfície e segurança viária.

Na busca pelos principais estudos relacionados à área de interesse, as bases de dados utilizadas nesta pesquisa foram *Science Direct* e *Scopus*. O *software* utilizado para construção e visualização das redes bibliométricas foi o *VOViewer*. Nas seções 2.1, 2.2 e 2.3 são apresentados os resultados da revisão sistemática utilizada no estudo. A escolha da língua estrangeira nas pesquisas objetivou alcançar o maior número de estudos de alto impacto.

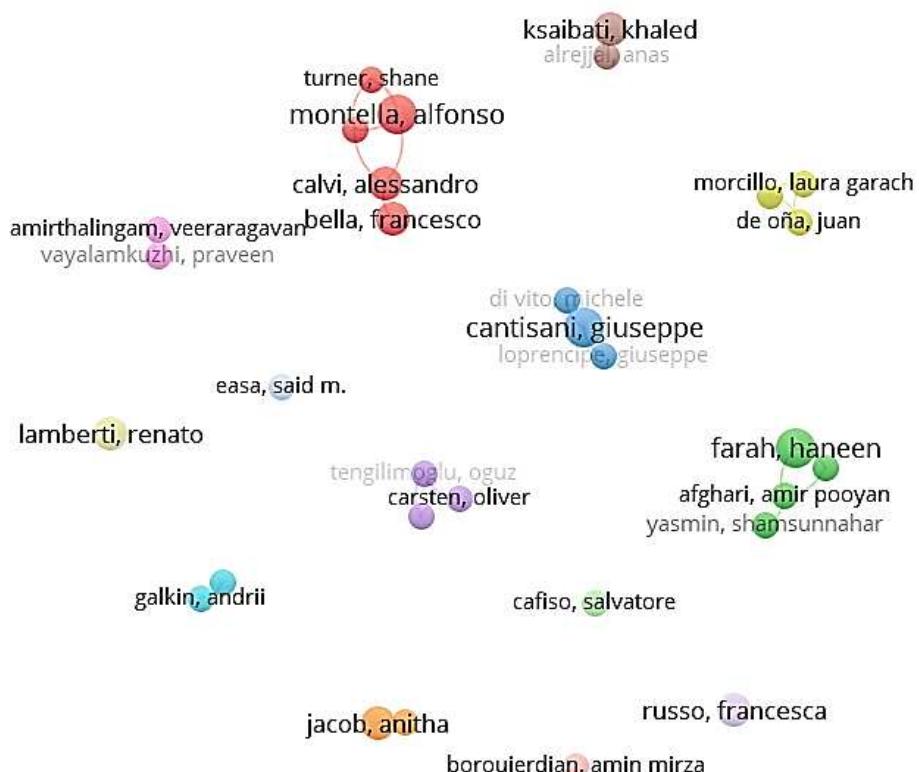
2.1. Projeto Geométrico de Rodovias e Segurança Viária

Para avaliar a temática envolvendo sinistros de trânsito e projeto geométrico de rodovias, o estudo foi dividido em três etapas. A 1^a etapa consistiu em aplicar a combinação de quatro palavras-chave: *road safety AND geometric design AND design consistency AND horizontal curves*. A 2^a etapa consistiu em avaliar as palavras-chave de todos os estudos da 1^a

etapa e verificar se há alguma palavra de impacto que não tinha sido considerada. Já a 3^a etapa integra os resultados das duas etapas anteriores para realizar uma nova pesquisa mais refinada.

O intuito da 1^a etapa foi conhecer os principais autores que trabalham na área, observar os estudos mais relevantes e verificar as principais palavras-chave. Para a primeira triagem, o período das publicações não foi limitado, porém, foi limitada a abrangência dos estudos, filtrando somente aqueles com acesso livre. Na Figura 1, é mostrada uma avaliação dos principais autores da primeira avaliação da pesquisa organizados em *clusters* – que são agrupamentos de trabalhos reunidos por afinidade temática.

Figura 1 - Análise dos principais autores que publicam sobre projeto geométrico de rodovias e segurança viária (palavras-chave: *road safety AND geometric design AND design consistency AND horizontal curves*).

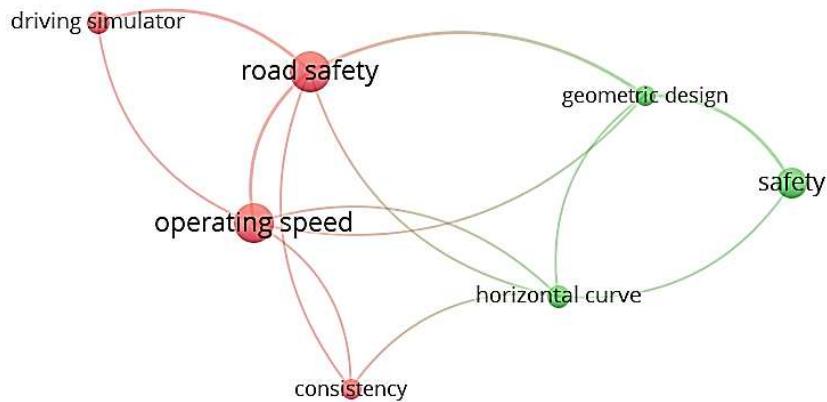


Fonte: Autor.

Na primeira análise, foram identificados 256 estudos. A partir da Figura 1, observa-se o grupo que interage com mais intensidade (em vermelho), tem como principal autor Alfonso Montella, da *University of Naples Federico II* (Itália). Outros grupos foram observados, como os representados pela cor rosa - Veeraragavan Amirthalingan e Praveen Vayalamkuzhi - da *University of California* (Estados Unidos) e *Indian Institute of Technology Madras* (Índia),

respectivamente. E também autores isolados, como Said M. Easa, Anitha Jacob e Salvatore Cafiso, da *Toronto Metropolitan University* (Canadá), *Faculdade Politécnica Governamental de Chelakkara* (Índia) e *Università degli Studi di Catania* (Itália), respectivamente. Apesar de não limitar o período, foi observado que os estudos captados foram realizados, principalmente, entre os anos de 2010 e 2024. Com o objetivo de avaliar se alguma palavra-chave de impacto é evidenciada nos estudos, além das palavras-chave das *strings* da pesquisa, a segunda etapa da pesquisa avaliou quais as principais palavras-chave de todos os estudos captados, dado demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Principais palavras-chave citadas pelos estudos sobre projeto geométrico de rodovias e segurança viária.

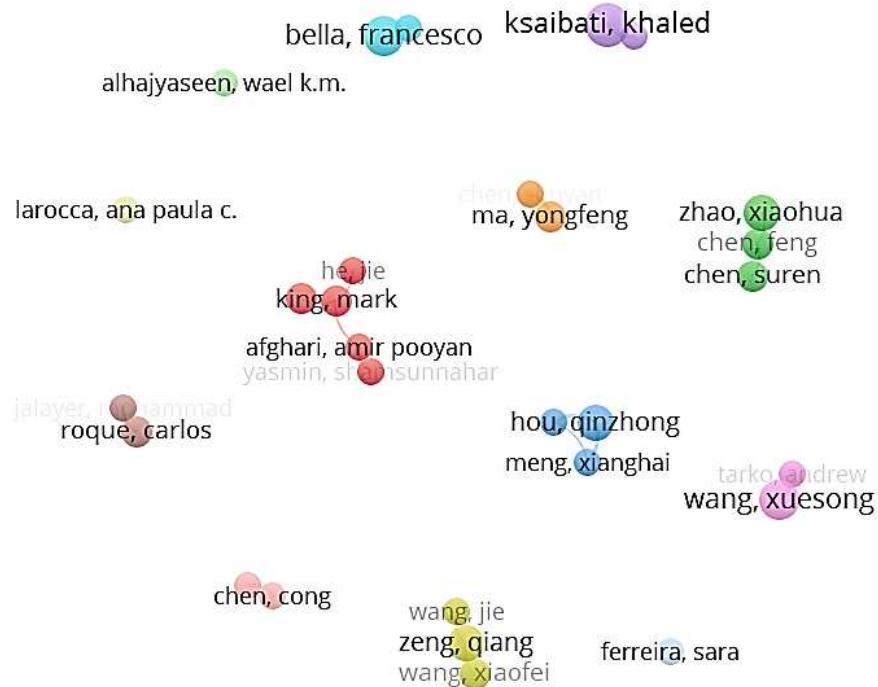


Fonte: Autor.

Com relação às palavras-chave, foram captadas duas palavras de maior impacto nos estudos, que são - *driving simulator* e *operating speed*, que não tinham sido *strings* da pesquisa até o momento. Foi observado que esse grupo está mais relacionado ao estudo da consistência do projeto geométrico e a segurança viária (vermelho). Enquanto que o outro grupo apresentou a interação entre geometria da via, curvas horizontais e segurança viária (verde). Esse fato não significa que os grupos trabalham separadamente, pelo contrário, foi constatado que eles se interligam (Figura 2).

Na 3^a etapa do estudo foi realizada nova pesquisa com as palavras-chave: *road safety AND geometric design AND horizontal curve AND driving simulation*, limitada aos 10 últimos anos (2014 a 2023). Na Figura 3 são mostrados os resultados da avaliação realizada na 3^a etapa.

Figura 3 - Análise dos principais autores da que publicam sobre projeto geométrico de rodovias e segurança viária (palavras-chave: *road safety AND geometric design AND horizontal curve AND driving simulation*).



Fonte: Autor.

Na 3^a etapa foram captados 402 estudos. Essa etapa evidenciou um grupo de autores que não tinha sido captado na 2^a etapa. Todos os trabalhos foram considerados na avaliação, e os critérios para seleção dos estudos abordados neste documento foram divididos em dois: 1) análise dos títulos e objetivos dos estudos e 2) análise dos resumos completos dos estudos. A partir da análise das três etapas da pesquisa, os principais autores são mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 - Autores utilizados na pesquisa de projeto geométrico e segurança viária.

Autor	Localidade	Instituição
Amirthalingam, Veeraragavan	Chennai, Índia	<i>Indian Institute of Technology Madras</i>
Bobermin, Mariane	Porto, Portugal	Universidade do Porto
Cafiso, Salvatore	Catania, Itália	<i>Università degli Studi di Catania</i>
Dhahir, Bashar	Ottawa, Canadá	<i>Carleton University</i>
Easa, Said M	Toronto, Canadá	<i>Toronto Metropolitan University</i>
Ferreira, Sara	Porto, Portugal	<i>Universidade do Porto</i>

Continuação do Quadro 1

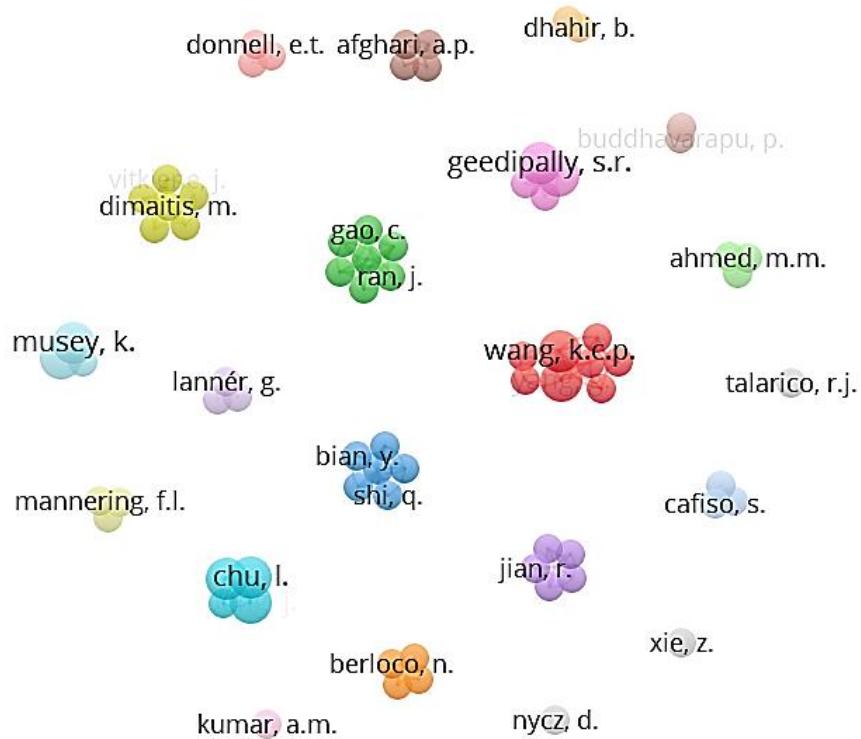
Autor	Localidade	Instituição
Hassan, Yasser	Ottawa, Canadá	<i>Carleton University</i>
Jacob, Anitha	Karala, Índia	<i>Chelakkara Poly Technic</i>
Larocca, Ana Paula C.	São Paulo, Brasil	Universidade de São Paulo
Montella, Alfonso	Nápoles, Itália	<i>University of Naples Federico II</i>
Vayalamkuzhi, Praveen	Berkeley, Estados Unidos	<i>University of California</i>
Wang, Xiaomeng	Shanghai, China	<i>Shanghai Maritime University</i>
Wang, Xuesong	Sydney, Australia	<i>University of New South Wales</i>
Zeng, Qiang	Virgínia, Estados Unidos	<i>George Mason University</i>

Fonte: Autor.

2.2. Condição de Superfície e Segurança Viária

Na análise da temática Condição de Superfície e Segurança Viária, foi utilizada a base de dados *Scopus*. O motivo da escolha foi a relevância dos estudos para a pesquisa, em comparação à base *Science Direct*, realizado numa análise preliminar. As palavras-chave utilizadas na pesquisa foram: *traffic safety AND friction AND horizontal curves*. O total de 30 estudos foram encontrados com essa combinação. Na Figura 4 são apresentados os principais autores que pesquisam na área.

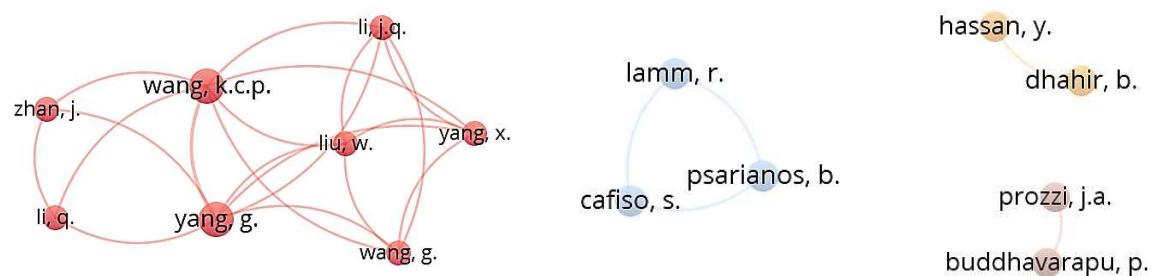
Figura 4 – Análise dos principais autores que publicam sobre condição de superfície e segurança viária (palavras-chave: *traffic safety AND friction AND horizontal curves*).



Fonte: Autor.

Apesar de parecerem grupos isolados, a análise é importante para detectar os principais autores na área, ainda que estes não interajam fortemente com os demais grupos. Na Figura 5 são mostrados alguns recortes dos grupos com mais aproximação.

Figura 5 - Recorte dos autores que pesquisam sobre a relação entre condição de superfície e segurança viária.



Fonte: Autor.

Após a identificação dos principais autores, o passo seguinte foi a realização de uma avaliação das publicações. Após a leitura dos resumos dos estudos mais relevantes, foi feita uma triagem das pesquisas mais importantes para este estudo. No Quadro 2 são mostrados

os 16 autores que foram utilizados neste estudo a partir da análise bibliométrica envolvendo condição de superfície e segurança viária. É importante mencionar que alguns autores citados também compõem o corpo de pesquisadores mostrados no item Projeto Geométrico e Segurança Viária, isso indica que há uma interação entre as duas temáticas.

Quadro 2 - Autores utilizados na pesquisa de condição de superfície e segurança viária.

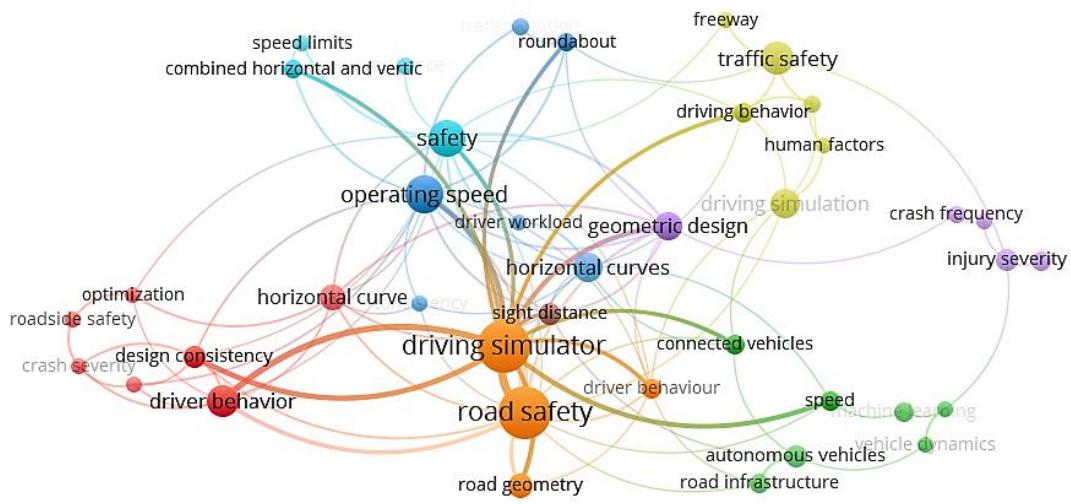
Autor	Localidade	Instituição
Buddhavarapu, Prasad	Austin, Estados Unidos	<i>Cockrell School of Engineering</i>
Cafiso, Salvatore	Catania, Itália	<i>Università degli Studi di Catania</i>
Choueiri, E.M.	Líbano	<i>Lebanese Universities</i>
Dhahir, Bashar	Ottawa, Canadá	<i>Carleton University</i>
Donnell, Eric T.	University Park, Estados Unidos	<i>Penn State College of Engineering</i>
Hassan, Yasser	Ottawa, Canadá	<i>Carleton University</i>
Himes, Scott C.	Estados Unidos	<i>VHB Raleigh</i>
Liu, X.	Illinois	<i>University of Illinois</i>
Oeser, Markus	Alemanha	<i>Federal Highway Research Institute</i>
Prozzi, Jorge A.	Austin, Estados Unidos	<i>Cockrell School of Engineering</i>
Psarianos, B.	Atenas, Grécia	<i>National Technical University of Athens</i>
Wang, Kai	Beijing, China	<i>Peking University Health Science Center</i>

Fonte: Autor.

2.3. Interação entre as Temáticas e Resumo dos Estudos

Com a realização da revisão envolvendo os impactos do projeto geométrico de rodovias e da condição de superfície na segurança viária (itens 2.1 e 2.2), foi observado que há uma interação entre as duas áreas. Por esse motivo, nesta etapa, foi realizada uma investigação das temáticas em conjunto, com o objetivo de verificar como os autores e as palavras-chave interagem entre si. Na Figura 6 são mostradas as interações das palavras-chave dos 688 artigos (256 e 402 artigos da 1^a etapa e 2^a etapa, respectivamente) da temática Projeto Geométrico de Rodovias e Segurança Viária e 30 artigos relacionados ao tema Condição de Superfície e Segurança Viária.

Figura 6 - Palavras-chave dos estudos que envolvem projeto geométrico de rodovias, condição de superfície e segurança viária.



Fonte: Autor.

A avaliação das palavras-chave demonstra a interação entre as áreas. Observou-se que o grupo em vermelho investiga consistência do projeto, comportamento do motorista e a severidade dos sinistros. O grupo azul claro investiga velocidade de operação e a combinação de curvas verticais e horizontais. Esses grupos estão interligados por uma palavra-chave principal: curva horizontal. Os agrupamentos do lado direito investigam a infraestrutura rodoviária, o comportamento do motorista e a segurança viária. Um fato importante encontrado durante a análise foi a identificação de palavras como: aprendizado de máquina, veículos conectados e comportamento humano. Essa indicação pode sugerir a presença de tecnologias, como sistemas embarcados, para tentar explicar a interação entre o projeto geométrico, velocidade, combinação de curvas e condição da superfície na segurança viária. Além disso, foram identificadas quatro palavras-chave principais: simulador de direção, segurança viária, velocidade de operação e curvas horizontais. O resultado pode indicar o uso de simuladores de direção como metodologia. Porém, aspectos reais (em campo), também devem ser levados em consideração e parecem ser uma lacuna de pesquisa a ser explorada.

Após a análise de todos os aspectos mostrados na seção de RS, os artigos publicados pelos autores citados nas seções 2.1 e 2.2 foram investigados a fim de filtrar as pesquisas mais relevantes referentes ao tema abordado. No Quadro 3 é mostrada uma descrição sucinta dos objetivos dos principais estudos utilizados na pesquisa. As investigações mais aprofundadas relacionadas às metodologias propostas nos estudos, os resultados, as conclusões e as contribuições serão tratadas no decorrer da revisão bibliográfica (item 3).

Quadro 3 - Principais estudos identificados na revisão sistemática da presente pesquisa.

	Estudo	Objetivo
1.	Buddhavarapu, Banerjee e Prozzi (2013)	Esta pesquisa objetivou desenvolver um modelo de gravidade de sinistros a partir da avaliação de um banco de dados de sinistros e das condições da superfície do pavimento.
2.	Himes e Donnell (2014)	O objetivo do estudo foi desenvolver uma abordagem probabilística para avaliar o projeto de curvas horizontais e comparar os mesmos com critérios de projeto.
3.	Andriejauskas, Vorobjovas e Mielonas (2014)	A finalidade do estudo foi investigar os principais métodos de análise dos coeficientes de atrito .
4.	Kordani e Molan (2015)	Foi realizada uma investigação acerca dos efeitos da combinação de curvas horizontais e da inclinação da rodovia nos coeficientes de atrito lateral .
5.	Montella e Imbriani (2015)	Os autores investigaram como a variação de velocidade, coeficientes de atrito e consistência nos alinhamentos afetam a segurança viária.
6.	Vayalamkuzhi e Amirthalingam (2016)	O objetivo da pesquisa foi analisar os sinistros de trânsito, por meio de análises estatísticas, e como às características do projeto geométrico influenciam nesses sinistros .
7.	Tanishita e Van Wee (2017)	A finalidade do estudo foi avaliar como velocidade e variação de velocidades médias impactam na ocorrência de sinistros .
8.	Choudhari e Maji (2019)	O objetivo do estudo foi avaliar como os parâmetros geométricos da via e a experiência do motorista influenciam no risco ao longo de curvas horizontais .
9.	Dahir e Hassan (2019)	O estudo objetivou desenvolver um modelo quantitativo para avaliação de desempenho de segurança viária , por meio de <i>Naturalistic Driving Study (NDS)</i> .
10.	Nasiri <i>et al.</i> (2020)	A pesquisa teve como principal objetivo avaliar a segurança em curvas horizontais de acordo com o proposto pela <i>AASHTO</i> .
11.	Ji <i>et al.</i> (2020)	O objetivo foi analisar as causas e os mecanismos que influenciam nos sinistros em seções de curvas planas .

Continuação do Quadro 3

Estudo	Objetivo
12. Cafiso <i>et al.</i> (2020)	A finalidade do estudo foi desenvolver modelos estatísticos para avaliar condição da superfície do pavimento, projeto geométrico e sinistros.
13. Bobermin e Ferreira (2021)	O estudo teve como objetivo avaliar o comportamento do motorista , por meio de simuladores de direção em diversas condições reais, para melhorar a segurança viária.
14. Wang, Yao e Ding (2021)	O estudo objetivou avaliar o impacto das curvas horizontais e verticais na segurança da via.
15. Santos, Oliveira e Larocca (2022)	A finalidade do estudo foi propor o uso de um modelo de simulador de direção para identificar os fatores que contribuem para sinistros de trânsito.
16. Arman e Tampere (2022)	O objetivo da pesquisa foi desenvolver uma abordagem para corrigir a geolocalização dos veículos com base em fusão de dados de diversos veículos.
17. Rondora, Pirdavani e Larocca (2022)	A pesquisa teve como objetivo compreender como as características geométricas da via (raios e tangentes de aproximação) e quais os impactos na segurança.
18. Jacob, Dhanya e Anjaneyulu (2023)	O objetivo foi avaliar a consistência do projeto geométrico por meio de dados estatísticos de velocidade operacional, para diferentes classes de veículos.

Fonte: Autor.

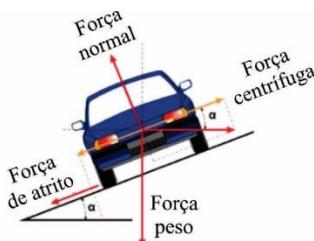
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Elementos do Projeto Geométrico

Uma via é avaliada pelo conforto, pela economia e pela segurança que proporciona aos usuários, o que está diretamente relacionado à fluidez no decorrer do trajeto. O Manual 706/20 (DNER, 1999) afirma que os critérios que devem estar presentes nos projetos das vias são definidos com a finalidade de manter a segurança e o conforto do usuário ao longo do trajeto. Além disso, diferentes parâmetros operacionais e geométricos estão correlacionados com a velocidade dos veículos (Antas *et al.*, 2010). Neste sentido, a geometria do projeto constitui-se como um dos fatores que contribuem para a variação de velocidade dos veículos e, como consequência, para a possibilidade de ocorrência dos sinistros de trânsito (Jacob; Dhanya; Anjaneyulu, 2013). Porém, os agentes de fiscalização atribuem as causas dos sinistros de trânsito, em muitos casos, apenas às condicionantes humanas, não levando em consideração a geometria da via, por exemplo (Lima *et al.*, 2008).

Os elementos do projeto geométrico da via têm sido discutidos na literatura. Alguns estudos mencionam que a consistência do projeto geométrico pode estar associada aos sinistros de trânsito. Múltiplas curvas e a combinação entre curvas horizontais e verticais podem explicar a mudança da trajetória considerada ideal, aceleração e desaceleração por parte do motorista (Jacob; Dhanya; Anjaneyulu, 2013; Wang; Wang, 2018). Chen *et al.* (2018), Choudhari e Maji (2019) e Santos, Oliveira e Larocca (2022) mencionam que os raios de curvas horizontais podem estar relacionados com as causas dos sinistros. Entende-se que, ao percorrer uma curva, a velocidade do veículo gera uma força centrífuga, que é contrabalanceada pela força de atrito transversal. Dessa forma, quanto maior for a força de atrito, mais segurança o condutor terá, porém, à medida que a força de atrito aumenta, o condutor sente uma sensação de desconforto, que está associada ao aumento do atrito transversal do pavimento, conforme mostrado no item 3.3.2. Na Figura 7 são mostradas as forças sobre o veículo em curva.

Figura 7 - Forças que atuam sobre o veículo em curva circular.



Fonte: Adaptado da NT-DE-F000/001 (DER, 2006).

Quando a força centrífuga é superior a força que tende a manter o condutor na curva (força centrípeta), há uma tendência de saída de pista e tombamento. Esse movimento está relacionado tanto com a velocidade quanto com os parâmetros geométricos da via, tais como raio da curva, superelevação e inclinações longitudinais.

3.1.1. Velocidade Diretriz e Ocorrência de Sinistros

A velocidade selecionada para fins de projeto da via é denominada velocidade diretriz. Por meio dela, são condicionadas as principais características do projeto, tais como: curvas horizontais e verticais, superelevação e distâncias de visibilidade (DNER, 1999). Essas velocidades diretrizes, quando mais elevadas, possibilitam redução do tempo de viagem dos condutores, contudo, para proporcionar segurança em vias com velocidades elevadas, normalmente, ocorre um aumento substancial nos custos de construção devido a adaptações do traçado, como curvas de raio longo. Referente a esse assunto, o DNER (1999) especifica algumas diretrizes, como as seguintes: em vias com velocidade de 60km, o raio deve ter 150 m; enquanto que para vias de 80 km/h, o raio mínimo necessário é de 280 m, uma diferença de 130 m (Antas *et al.*, 2010). As velocidades diretrizes de projeto são estabelecidas de acordo com a classificação da via (Tabela 1). O DNER (1999) especifica as classes de projeto conforme mostrado no Quadro 4.

Tabela 1 - Velocidades diretrizes em função da classe de projeto e do relevo.

Classe de projeto	Velocidades diretrizes para projeto (km/h)		
	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	120	100	80
Classe I	100	80	60
Classe II	100	70	50
Classe III	80	60	40
Classe IV	80 - 60	60 - 40	40 – 30

Fonte: Adaptado DNER (1999).

Quadro 4 - Classes de projeto de acordo com as características.

Classes de projeto	Características
Classe 0	Via expressa: rodovias de alto padrão técnico, com pista dupla e controle total de acesso, com Volume Médio Diário (VMD) acima de 2.600
Classe I – A	Rodovias com duas pistas e controle parcial de acesso
Classe I – B	Rodovias de pista simples, com VMD superior a 1.400
Classe II	Rodovias de pista simples com limites de 700 a 1.400 de VMD
Classe III	Rodovias de pista simples com limites de 300 a 700 de VMD
Classe IV – A	Rodovias de pista simples, com características técnicas mínimas suficientes, com VMD entre 50 e 200
Classe IV – B	Rodovias de pista simples, com características técnicas mínimas suficientes, com VMD menor que 50

Fonte: Adaptado DNER (1999).

A velocidade diretriz do projeto é uma premissa importante para a segurança. Com o objetivo de verificar quais condicionantes estão associadas aos sinistros de trânsito, simuladores de direção são utilizados a partir de geometrias reais para investigar como a velocidade do condutor está relacionada a ocorrência de sinistros (Santos; Oliveira; Larocca, 2022). Tanishita e Van Wee (2017) analisaram como a velocidade média e a variação de velocidade influenciam nos sinistros. Os autores avaliaram, aproximadamente, 142 mil amostras de veículos no Japão, entre 2013 e 2014, totalizando 78 sinistros. Para as análises, foram utilizados dados históricos de velocidades e variação de velocidades, obtidas por fiscalização eletrônica. Cada amostra foi coletada no espaço temporal de 5 minutos ao longo da via, dessa forma, cada veículo poderia ser contabilizado diversas vezes no trecho. Como conclusão, o estudo mostrou uma maior probabilidade de ocorrência de sinistros quando a velocidade média reduz de 110 para 85 km/h (variação de 25 km/h) e quando esta aumenta de 65 para 90 km/h (variação de 25 km/h). Esse resultado aponta que perturbações externas ou inconsistências no projeto que modifiquem a velocidade, podem resultar em sinistros. Apesar da importante contribuição, o estudo não verificou em quais elementos do traçado ocorreram os sinistros. Além disso, não foi feita uma verificação de variação da velocidade instantânea do veículo, o que poderia fornecer mais dados a respeito da condução veicular e auxiliar na interpretação das variáveis.

Nesse mesmo contexto, a segurança do condutor na estrada está relacionada ao padrão homogêneo da velocidade ao longo de todo o trecho, evitando surpresas para o motorista e proporcionando um padrão uniforme de operação na condução. Porém, devido a diferentes fatores, os veículos não conseguem percorrer todo o trecho da estrada com a velocidade de projeto, o que pode gerar insegurança no trânsito (Figueira, 1984).

3.1.1.1. Raios Mínimos de Curvas Horizontais e Superelevação

O DNER (1999) define raios mínimos de curvatura horizontal como os menores raios que podem ser percorridos em condições aceitáveis de segurança e conforto, considerando a velocidade diretriz e a taxa máxima de superelevação. De acordo com o manual, quando a velocidade diretriz de projeto e a superelevação máxima são fixadas, calcula-se o raio mínimo das curvas de concordância horizontal. Este raio é definido como o menor possível para manter a segurança do motorista. Na Equação 1 é mostrada a expressão para definir o raio mínimo a ser adotado e na Tabela 2 é mostrado um resumo dos raios mínimos de acordo com a superelevação.

$$R = \frac{V^2}{127 \times (e + ft)} \quad (1)$$

Nas quais:

- R Raio da curva (m);
- V Velocidade (km/h);
- e Superelevação (m/m);
- ft Coeficiente de atrito transversal (adimensional).

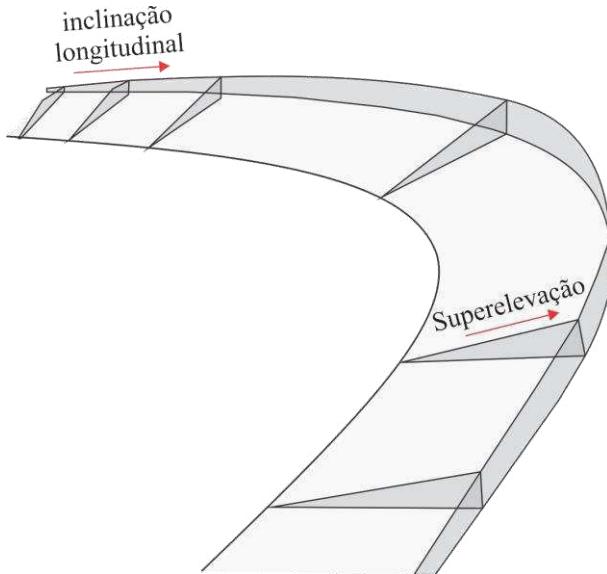
Tabela 2 - Raios mínimos (m) em função da superelevação máxima (%) e velocidade operacional (km/h).

Velocidade diretriz (km/h)	60	70	80	90	100	110	120
Superelevação máxima (%)	Raio mínimo (m)						
4	150	205	280	355	465	595	755
6	135	185	250	320	415	530	665
8	125	170	230	290	375	475	595
10	115	155	210	265	345	735	540
12	105	145	195	245	315	400	490

Fonte: Adaptado do DNER (1999).

Antas *et al.* (2010) mencionam que o projeto de uma rodovia deve ser planejado para atender a vários tipos de veículos, desde os leves até os mais pesados. No caso dos pesados, curvas com superelevações excessivas (cerca de 10%) podem gerar desequilíbrio do veículo e possível tombamento. Por outro lado, superelevações baixas (inferior a 4%) podem diminuir a segurança para veículos leves em velocidades próximas do limite. Na Figura 8 é mostrado um exemplo de superelevação, enquanto na Tabela 3 são especificadas as recomendações dos usos das superelevações de acordo com o DNER (1999).

Figura 8 - Superelevação em curva horizontal.



Fonte: Adaptado do DNER (1999).

Tabela 3 - Valores máximos recomendados de superelevação (%).

Superelevação (%)	Classificação da rodovia
12	Situações especiais
10	Rodovias de Classes 0 e I, em regiões planas e onduladas
8	Rodovias de Classes I, III e IV e Classe I, em regiões montanhosas
6	Projetos condicionados por urbanização adjacente

Fonte: Adaptado do DNER (1999).

Para raios de curva superiores aos mínimos, o DNER (1999) recomenda que a superelevação seja adotada de acordo com a Equação 2, contudo, para os raios superiores aos mostrados na Tabela 4, a superelevação é dispensável (para as velocidades citadas). Para Antas *et al.* (2010), é recomendado que a superelevação mínima seja de 2%.

$$e = e_{máx} \cdot \left(\frac{2 \times R_{min}}{R} - \frac{R^2_{min}}{R} \right) \quad (2)$$

Nas quais:

- e Taxa de superelevação a adotar (m/m);
- $e_{máx}$ Taxa de superelevação adotada (m/m);
- R Raio da curva (m);
- R_{min} Raio mínimo para a taxa de superelevação adotada (m).

Tabela 4 - Valores de raio (m) acima dos quais a superelevação é dispensável.

V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	> 100
R (m)	450	800	1.250	1.800	2.450	3.200	4.050	5.000

Fonte: Adaptado do DNER (1999).

À medida que a superelevação aumenta, a força de atrito transversal também aumenta (Figura 7). Antas *et al.* (2010) afirmam que o coeficiente de atrito transversal é uma variável que depende de diversos fatores, como desenho, estado e pressão dos pneus, rugosidade do pavimento, avaliada por meio da macrotextura, e condições atmosféricas. Por este motivo, não existe uniformidade nos resultados do coeficiente de atrito. Apesar disso, o DNER (1999) especifica os valores máximos admissíveis de atrito transversal (Tabela 5).

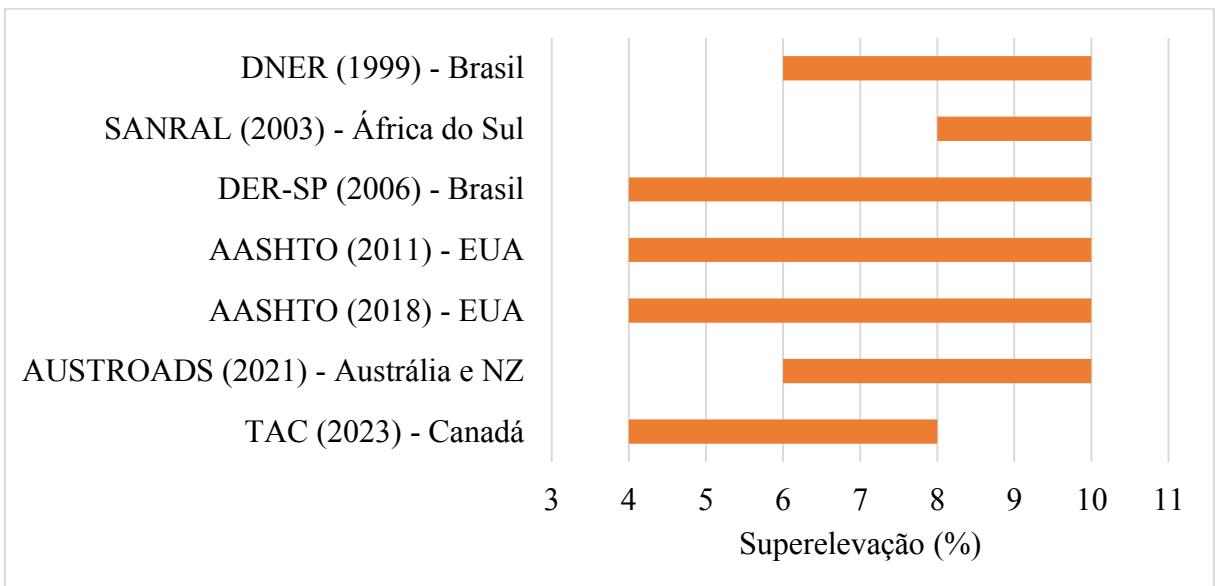
Tabela 5 - Máximos coeficientes de atrito transversal admissíveis.

Velocidade diretriz (km/h)	60	70	80	90	100	110	120
Coeficiente de atrito transversal, $f_{máx}$	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11

Fonte: Adaptado do DNER (1999).

Quando se analisa essa temática em um contexto mundial, as normas tratam raios de curvas horizontais, velocidades e coeficientes de atrito fisicamente da mesma forma que o DNER (1999) (Equação 1). Porém, há divergência com relação as velocidades de projeto e os limites de superelevação. Este fato reflete diretamente nos limites de raios de curvas. Na Figura 9 são mostrados alguns limites de superelevação em normas internacionais.

Figura 9 - Superelevação de acordo com algumas normas internacionais



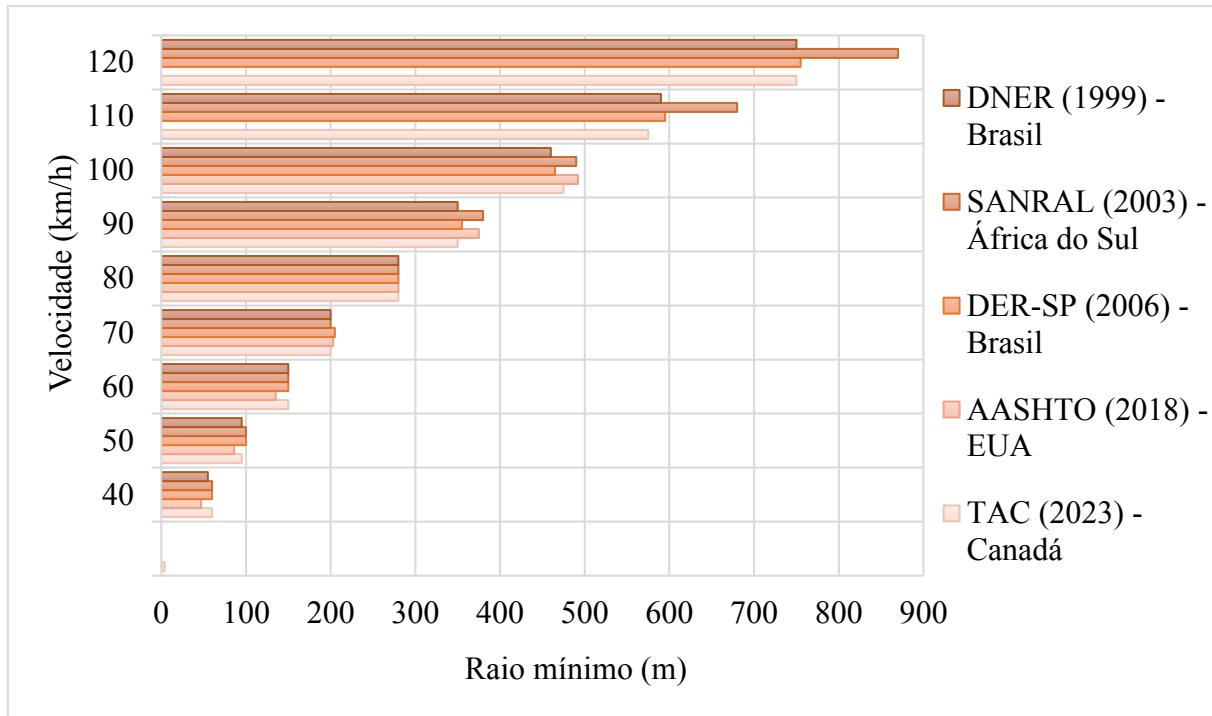
NZ – Nova Zelândia

Fonte: Adaptado de DNER (1999), SANRAL (2003), DER-SP (2006), AASHTO (2011), AASHTO (2018), AUSTROADS (2021) e TAC (2023).

As taxas e limites de superelevação não são constantes para todas as normas. Na Figura 9 é demonstrado que algumas normas são mais conservadoras, como a SANRAL (2003), com a superelevação entre 8 e 10%. Outras possuem maior liberdade, entre 4 e 10%, como DER-SP (2006), AASHTO (2011) e AASHTO (2018). Este fato pode estar associado às condições atuais com relação aos veículos e ao clima, visto que a presença de neve, de água e do próprio uso modificam as propriedades da superfície do pavimento.

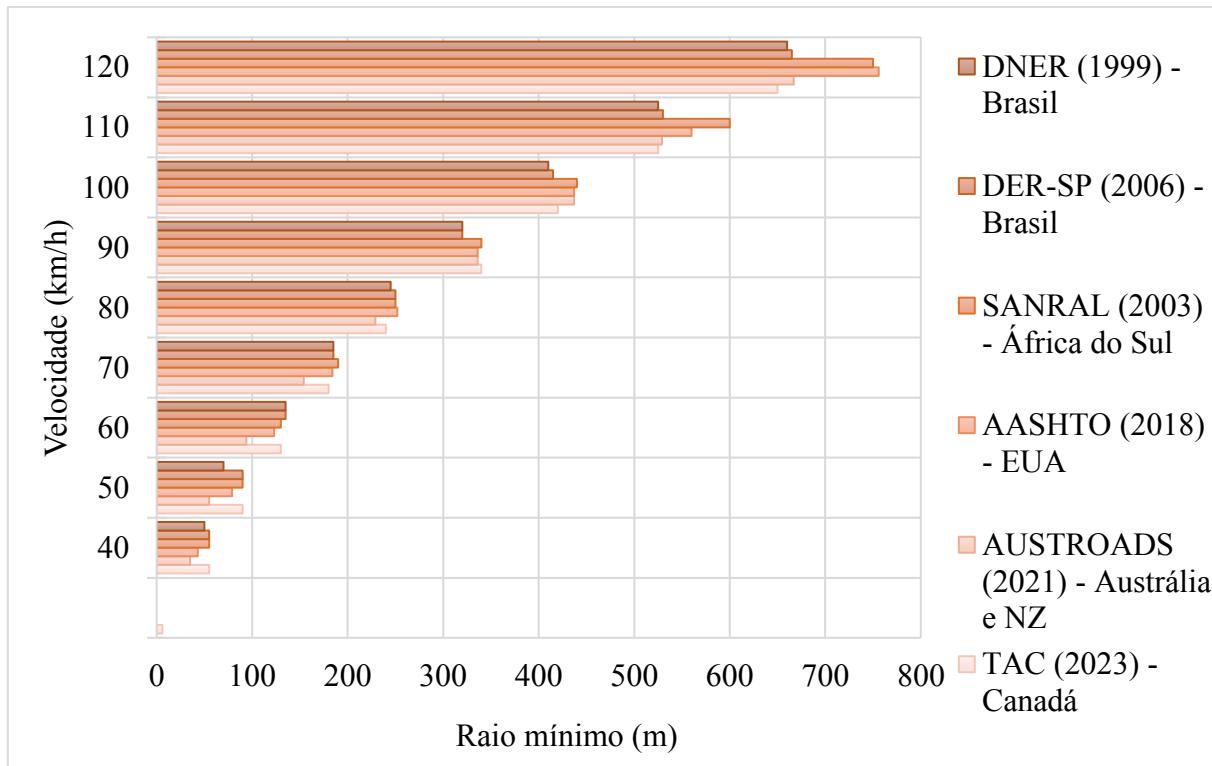
Como mostrado na Equação 1, o raio da curva é proporcional a velocidade e inversamente proporcional à superelevação e ao atrito transversal. Por esse motivo, os raios de curva também são diferentes nas metodologias avaliadas. Na Figura 10, Figura 11 e Figura 12 são mostrados os limites de raios de curva de acordo com a superelevação (4%, 6% e 8%, respectivamente) e com a velocidade de projeto, para algumas normas internacionais e brasileiras.

Figura 10 - Limites de raios mínimos (m) de curvas horizontais para 4% de superelevação



Fonte: Adaptado de DNER (1999), SANRAL (2003), DER-SP (2006), AASHTO (2018) e TAC (2023).

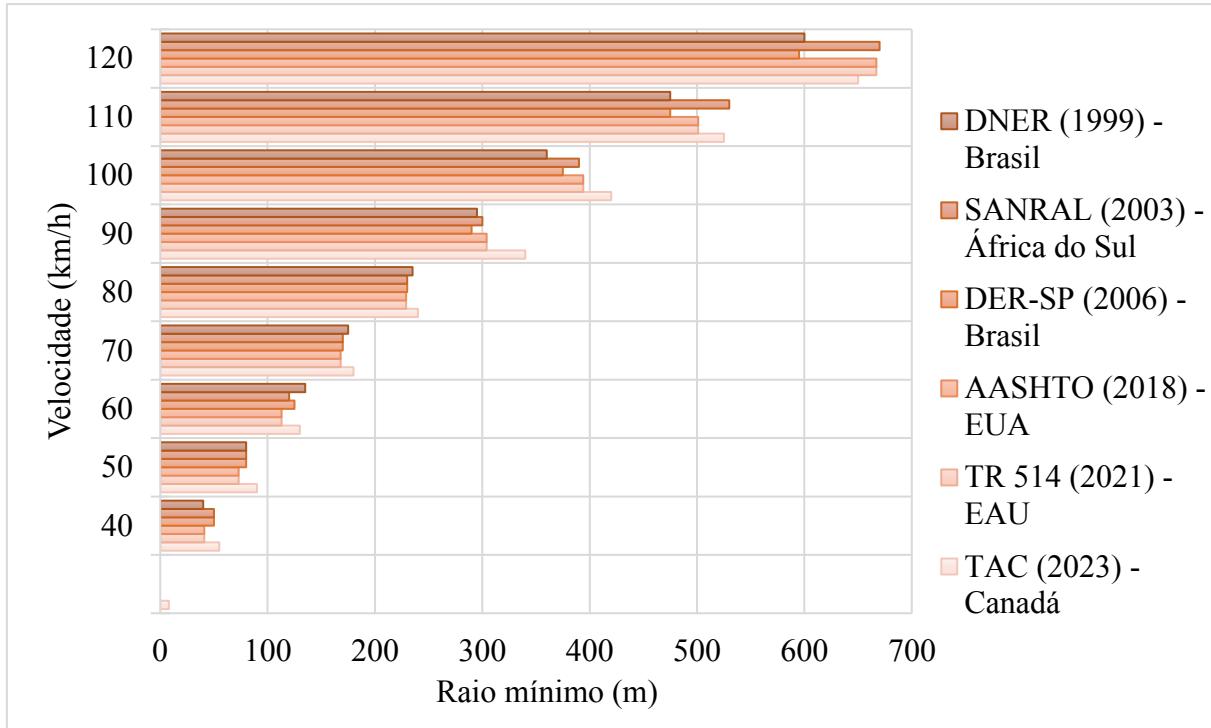
Figura 11 - Limites de raios mínimos (m) de curvas horizontais para 6% de superelevação



NZ – Nova Zelândia

Fonte: Adaptado de DNER (1999), SANRAL (2003), DER-SP (2006), AASHTO (2018), AUSTROADS (2021) e TAC (2023).

Figura 12 - Limites de raios mínimos (m) de curvas horizontais para 8% de superelevação



EAU – Emirados Árabes Unidos

Fonte: Adaptado de DNER (1999), SANRAL (2003), DER-SP (2006), AASHTO (2018), TR 514 (2021) e TAC (2023).

De modo geral, os raios de curvas mantêm o mesmo padrão entre as normas analisadas, com pequenas variações. A *SANRAL* e a *AASHTO* são as mais conservadoras para altas velocidades, com raios mínimos superiores às demais normas (para a superelevação de 6% e velocidade de 120 km/h, por exemplo, *SANRAL* e *AASHTO* admitem raios mínimos de aproximadamente 750 m, enquanto as demais normas adotam raios mínimos, em média, de 650 m, uma diferença de 100 m entre os raios). O *DNER* e o *DER-SP* seguem um padrão próximo da média das demais normas, porém, são menos conservadoras para altas velocidades, admitindo raios inferiores aqueles citados pelas normas como *SANRAL* e *AASHTO*.

Figueira (1984) afirma que um trecho em curva deve garantir a inscrição dos veículos, a visibilidade dentro dos cortes e a estabilidade dos veículos que percorrem a via com grandes velocidades. Porém, estudos como os de Jacob, Dhanya e Anjaneyulu (2013), Wang e Wang (2018), Rondora, Pirdavani e Larocca (2022) e Santos, Oliveira e Larocca (2022) apontam para a velocidade e para a variação de velocidade, em curvas, como os principais aspectos que envolvem sinistros de trânsito.

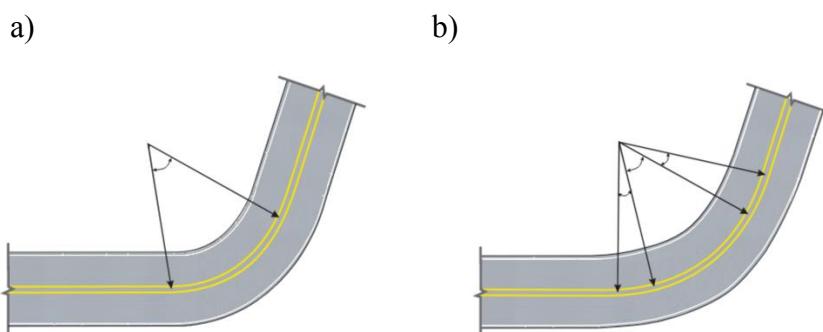
Nesse contexto, Flintsch *et al.* (2012) afirmam que o coeficiente de atrito pode variar dependendo do ponto do traçado da via. Este fenômeno é explicado devido ao desgaste do pavimento decorrente das ações dos veículos e intempéries ao longo do tempo. Apesar das manutenções periódicas para manter o pavimento em boas condições, é importante investigar se as superfícies apresentam os mesmos parâmetros em diferentes pontos na via.

Diante disso, é importante destacar que a não uniformidade do atrito associada aos parâmetros geométricos da via (curvas horizontais e tangentes de aproximação às curvas) tem sido pouco investigada para explicar uma possível causa dos sinistros de trânsito, especialmente, nos estudos que utilizam simuladores de direção. Para Cafiso *et al.* (2020), o projeto geométrico de rodovias associado à superfície do pavimento, para avaliar a segurança viária, é pouco investigado. Compreende-se que a complexidade da coleta de dados e a variabilidade temporal das condições da superfície são fatores determinantes para a não investigação.

3.1.1.2. Concordância com Curva Circular

É característica da concordância horizontal a modificação de trechos entre duas curvas circulares simples, de raio constante ou pela combinação de curvas de raios variáveis com curvas de raios constantes. As curvas de transição têm como principal objetivo fornecer uma trajetória natural para os veículos, em que a força centrífuga cresce gradualmente na passagem da tangente para a curva circular (DNER, 1999). Na Figura 13 é mostrado um exemplo de: a) curva circular simples e b) curva com espiral de transição.

Figura 13 - Curva horizontal a) simples e b) com espiral de transição.



Fonte: Adaptado do DNER (1999).

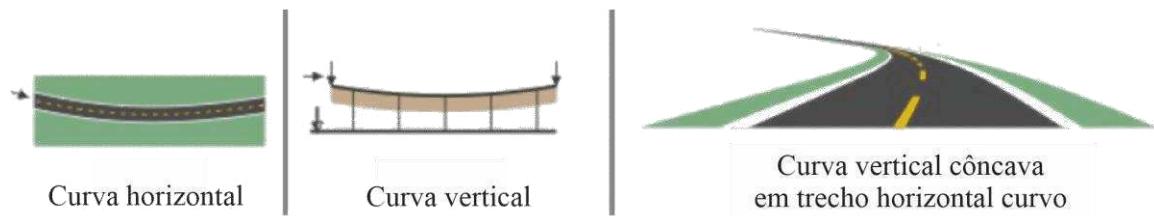
No momento em que um veículo passa de um trecho reto, de raio infinito, para um trecho de raio finito (curva horizontal), surge bruscamente uma força centrífuga que tende a

desviar o veículo da sua trajetória, conforme demonstra a Figura 13. Essa mudança pode estar relacionada com a variação de velocidade e com a inconsistência do condutor, que muda o padrão de condução e não mantém a homogeneidade ao longo do trajeto, ação que pode ocasionar sinistros (Aarts; Van Schagen, 2006; Vayalamkuzhi; Amirthalingam, 2016).

Nesse contexto, Figueira (1984) destaca a importância de suavizar as curvas horizontais por meio da introdução de uma curva de transição entre a tangente de raio infinito e a curva circular. Esse método permite que o condutor faça uma transição gradual do raio infinito para o raio finito, melhorando a experiência de direção e a segurança ao contornar as curvas. A curva de transição proporciona ao motorista um crescimento gradual da aceleração centrífuga, que constitui uma adequada extensão para efetuar o giro da pista até a posição de superelevação em curva e a transição gradual da trajetória. Essa inserção minimiza a variação no padrão de condução e reduz a possibilidade de sinistros (Choudhari; Maji, 2019).

Com base nas considerações do Manual 706/20 do DNER (1999), a respeito da integração de concordâncias verticais e horizontais, fica evidente que há uma lacuna e uma falta de avaliação quantitativa, por meio de método de cálculo, para projetar e aferir a concordância de alinhamentos. O manual menciona, apenas, que a combinação dos elementos geométricos básicos da rodovia deve conferir aos usuários características de segurança e conforto. Porém, não menciona (nem quantifica) quais são os parâmetros que devem ser adotados para melhoria da segurança. Na Figura 14 é mostrada uma curva com concordância horizontal e vertical.

Figura 14 - Elementos de projeto tridimensionais da concordância entre curva horizontal e vertical.



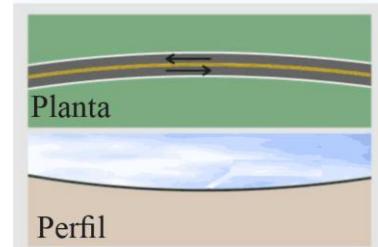
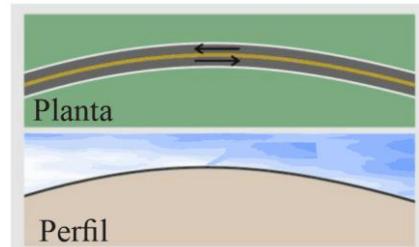
Fonte: Adaptado de Lamm (1999) e DER-SP (2006).

Investigações conduzidas por Wang, Yao e Ding (2021) em um estudo realizado com 1.786 dados de sinistros em 243 km de rodovia, analisaram a influência das concordâncias horizontal e vertical na segurança rodoviária (Figura 15). Os autores acreditam que métodos de projeto que consideram alinhamentos verticais e horizontais separadamente influenciam negativamente na segurança, entendimento já mencionado por Ji *et al.* (2020). Nessa perspectiva, o DER (2006) afirma que os alinhamentos horizontal e vertical estão entre os

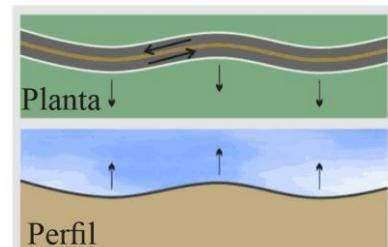
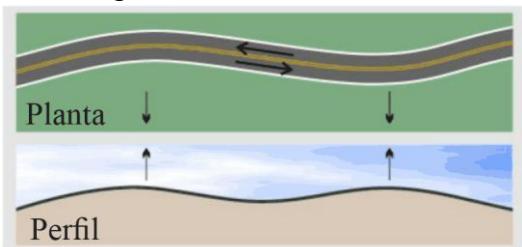
elementos mais importantes do projeto geométrico, e não devem ser estudados e projetados de forma separada. Combinações equivocadas destes podem afetar a segurança em trechos da via. Porém, a mesma citação destaca que devido a características distintas das rodovias e das regiões, não é possível determinar um padrão de alinhamento aplicado a todos os casos. Referências como Lamm *et al.* (1999), DER (2006) e AASHTO (2018) mencionam diversas situações que visam nortear as considerações de alinhamentos (Figura 15).

Figura 15 - Elementos recomendados para o alinhamento do projeto geométrico.

- a) Curva horizontal com curva vertical convexa.
- b) Curva horizontal com curva vertical côncava.



- c) Vértices de curvas dos alinhamentos horizontal e vertical coincidentes e tangente entre curvas.
- d) Vértices de curvas dos alinhamentos horizontal e vertical coincidentes.



Fonte: Adaptado de Lamm *et al.* (1999), DER (2006) e AASHTO (2018).

Bella (2014) realizou um estudo como objetivo de verificar a combinação entre curvas horizontais e verticais em pista simples. Para tanto, a pesquisa envolveu duas curvas (A e B), com raios de 252 e 437 m, respectivamente, projetadas em três cenários distintos no simulador de direção. No cenário de referência (1º), A e B eram planas. No cenário sugerido (2º) pelas normas e literaturas, as curvas horizontal e vertical tinham os vértices coincidentes e as inclinações longitudinais que variavam de -2,0 para 1,5% para a curva A e -4,0 para 2,9% para a B, ou seja, havia mudança de rampa descendente para ascendente no centro da curva horizontal. No cenário crítico (3º), as curvas tinham as mesmas inclinações do 2º cenário, contudo, o final da curva vertical coincidia com o início da curva horizontal, ou seja, curva com concordâncias que não coincidiam. Como resultado, a autora avaliou que o 1º e 2º cenário tinham variações de velocidades similares, cerca de 17,1 e 16,8 km/h, na sequência. No 3º cenário, a variação foi a mais alta, igual a 22 km/h. A autora observou também que as

velocidades nas tangentes eram similares nos três cenários, média de 117 km/h. Já nas curvas, a média foi de 100 km/h.

Como resultado, Bella (2014) concluiu que a velocidade da tangente não é afetada pela percepção do motorista sobre o tipo de curva. Além disso, a autora afirmou que a diferença de velocidade dos condutores depende inteiramente da condução percebida pelo tipo de curva. As análises também mostraram que a combinação crítica estava relacionada com a alta redução de velocidade do motorista, o que pode ter sido causada pela reação do motorista à percepção do alinhamento equivocado da estrada.

Wang e Wang (2018) também realizaram investigações sobre curvas combinadas. O estudo envolveu 70 curvas envolvendo cerca de 1400 viagens de simulação. Os autores avaliaram quatro tipos de curvas combinadas: curva horizontal com rampa descendente (A), curva horizontal com rampa ascendente (B), curva horizontal com curva vertical com eixos coincidindo e rampas mudando de declive para acrivel, isto é, curva côncava (C) e curva horizontal com curva vertical com eixos coincidindo e rampas mudando de acrivel para declive, curva convexa (D). Todas as combinações seguiam as recomendações citadas nos manuais de projeto. Como resultado, viagens com variações acima de 10 km/h foram observadas em cerca de 30% nas curvas A e B, 45% na curva C e 35% na D.

Os autores avaliaram que os efeitos de comportamento de mudança de velocidade dos motoristas variam de acordo com o tipo de curva combinada. Os autores concluíram que os motoristas tendem a aumentar a velocidade em curvas côncavas (C) e diminuir a velocidade em curvas convexas (D). Como conclusão, o estudo apontou que curva convexa pode sugerir uma curvatura vertical mais acentuada do que realmente é, enquanto curvas côncavas, se parecem mais planas.

A análise da concordância como possível causa dos sinistros de trânsito não tem sido devidamente investigada na literatura. Apesar disso, os estudos existentes convergem no entendimento de que a variação da velocidade pode estar associada aos sinistros de trânsito (Tanishita; Van Wee, 2017). Assim, a concordância horizontal de curvas é uma lacuna de pesquisa a ser explorada.

3.2. Método da Visão Zero, Sistemas Seguros e Rodovias que Perdoam

O desenvolvimento da abordagem Visão Zero surgiu na Suécia na década de 1990 e consiste na premissa de que nenhuma morte ou lesão permanente no trânsito, em decorrência de sinistro, é aceitável. A teoria por traz do método baseia-se em quatro princípios fundamentais: os humanos são fáliceis e erros acontecem; os seres humanos são incapazes de suportar altas forças de colisão; projetistas, construtores e usuários devem prevenir ou minimizar danos provenientes de erro humano ou projeto inadequado; o sistema público deve ser fortalecido com comportamentos, veículos, estradas e velocidades seguras e se uma parte falha, o usuário ainda deve estar protegido (Jurewicz *et al.*, 2016; Corben; Peiris; Mishra, 2022).

O sucesso progressivo envolvendo o Visão Zero fez com que seus conceitos fossem difundidos em diversos países da Europa, Austrália e Nova Zelândia. O conceito inspirou intervenções na segurança no trânsito e como consequência, os índices de sinistros no trânsito reduziram significativamente (Ngo *et al.*, 2022; Kgan; Das, 2024). Posteriormente, a abordagem Visão Zero serviu de base para a criação de outros métodos.

Usando a implementação dos pilares da Visão Zero, o Sistema Seguro é uma abordagem metodológica que identifica maneiras pelas quais os princípios podem interagir juntos para prevenir e minimizar os sinistros (Jurewicz *et al.*, 2016). Além desses parâmetros, o Plano Global de Segurança Rodoviária (*WHO*, 2021) menciona que deve haver busca constante com a melhoria proativa e contínua nas estradas e dos veículos. Além disso, os sistemas de transporte não devem aceitar mortes e feridos graves em decorrência de sinistros e que a segurança não deve ser comprometida com fatores como custos e aumento no tempo de viagem.

Outra abordagem foi a de Rodovias que Perdoam (do inglês *forgiving roads*), surgiu na Europa e é reflexo das implementações do Visão Zero. O método também parte do princípio que erros humanos acontecem e a geometria da estrada deve permitir espaço adequado para o ajuste do comportamento. Se esse ajuste não for possível, a estrada deve ser planejada de modo que minimize os impactos e a gravidade do sinistro. O método Rodovias que Perdoam adota os princípios do Visão Zero complementares às características geométricas da via que ajudam a proteger os condutores, tais como estradas mais largas, bem sinalizadas, barreiras de proteção e áreas de escape (CEDR, 2012).

Outro método que tem como objetivo o Visão Zero é o Modelo de Segurança de Multidão do Queijo Suíço (do inglês *The Swiss Cheese Model of Crowd Safety*). Ele também parte da hipótese de que erros acontecem e que, na ausência de medidas de segurança adequadas, os riscos podem custar vidas. Para mitigar esses riscos, o método propõe que sejam implementadas várias camadas de medidas de segurança e se uma falhar, a outra dá um suporte para evitar ou minimizar os sinistros. Além dos parâmetros citados na Visão Zero, o modelo de Queijo Suíço baseia-se no monitoramento em tempo real e controle de multidões (Haghani *et al.* 2023).

Ngo *et al.* (2022) avaliam que a implementação dos parâmetros como o do Visão Zero tivera impacto significativo nos sinistros de trânsito e resultaram no aumento da segurança nas estradas. Um levantamento realizado pela *World Resources Institute* citou que as aplicações desses métodos resultaram em redução de 50% nas taxas de mortalidade entre 1994 e 2015 em 53 países. Na Suécia, por exemplo, entre os anos de 2009 e 2014 a redução nas mortes no trânsito também foi de 50%. No ano de 2016, o país alcançou o menor número de registros de mortes (256) e, desde então, é o país com menor taxa de mortalidade no trânsito (Signor *et al.*, 2018; Khan; Das, 2024).

Um dos conceitos dos métodos Visão Zero e Sistemas Seguros é o gerenciamento da velocidade para reduzir a gravidade dos ferimentos e prevenir colisões. A maioria das abordagens usa o 85º percentil das velocidades dos condutores para definir esses limites aceitáveis. Contudo, pesquisas mostram que os condutores baseiam sua velocidade (até certo ponto) no limite da via. Apesar disso, é importante compreender que a definição dos limites das velocidades requer uma abordagem holística e deve considerar geometria das estradas, infraestrutura do pavimento, definição de limites de velocidade, educação e fiscalização (CEDR, 2012; Khan; Das, 2024).

Alguns estudos pontuais analisam o impacto positivo da implementação dos métodos discutidos e redução de limites de velocidade, como o de Fridman *et al.* (2020). Os autores avaliaram os sinistros de trânsito nas vias locais de Toronto no período de 4 anos. Durante dois anos, a velocidade limite era de 40 km/h; após as implementações, a limite foi ajustado para 30 km/h (últimos dois anos da análise). Como resultado, a pesquisa indicou que após a redução da velocidade, que houve uma redução dos sinistros em 28%. Além disso, houve uma redução de 72% nos casos de lesões graves.

Os parâmetros do Visão Zero e os métodos que surgem a partir desse modelo são importantes para melhorar a segurança viária. Nas rodovias rurais, em especial, a velocidade do condutor pode ter uma contribuição significativa na segurança. Propostas de ajustes da geometria na estrada para minimizar os impactos dos possíveis erros, alinhadas ao monitoramento em tempo real do método Queijo Suíço podem ter uma contribuição essencial para a segurança viária.

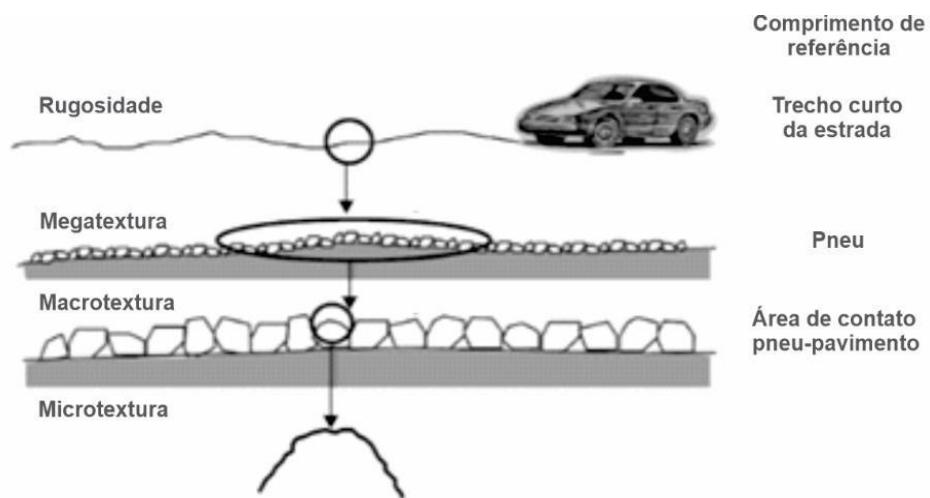
3.3. Interação Pneu-Pavimento

3.3.1. Condição da Superfície e Sinistros de Trânsito

A interação entre características do projeto geométrico, dos veículos e da condição de superfície afetam, consideravelmente, a segurança viária (Buddhavarapu *et al.*, 2013; Nasiri *et al.*, 2020; Oubahdou *et al.*, 2021; He *et al.*, 2021; Santos; Oliveira; Larocca, 2022). Compreende-se que superfícies mais confortáveis para dirigir, com textura menos rugosa, tendem a aumentar o comportamento agressivo e, consequentemente, a direção perigosa por parte dos motoristas (Buddhavarapu *et al.*, 2013; Cafiso *et al.*, 2020).

Kumar e Gupta (2021) apontam que um fator que impacta, diretamente, os sinistros de trânsito é a condição da superfície do pavimento. Esses autores categorizam a resistência à derrapagem dos veículos em quatro grupos principais, sendo eles: as características da superfície do pavimento; as configurações operacionais do veículo; as propriedades dos pneus e as condições ambientais e climáticas. Ainda segundo esses autores, as características da superfície podem ser subdivididas em macrotextura, microtextura, tipo de superfície, propriedades dos agregados (forma e tamanho) e envelhecimento da superfície. A Figura 16 mostra a diferença entre as texturas do pavimento e como elas estão relacionadas.

Figura 16 - Faixas de textura para superfície de pavimentos.



Fonte: Adaptado de Sandberg (1998) *apud* Kumar e Gupta (2021).

A macrotextura do pavimento pode ser associada ao grau de rugosidade definido pelos desvios entre as partículas dos agregados. Ela é a principal responsável por induzir o atrito devido à histerese para veículos em alta velocidade e pode ser estimada pela porcentagem de pontos de contato (Dunford, 2013). Já a microtextura está associada aos mecanismos de adesão e à textura superficial dos agregados, ela é responsável por introduzir o atrito a baixas velocidades. A microtextura está relacionada com a capacidade dos agregados de resistir ao polimento com o passar do tempo (Wang *et al.*, 2018). No Quadro 5 são mostrados os principais parâmetros da norma ISO 25178-2 (2012) e os seus significados. Os parâmetros de altura são quantificados em altura, na unidade milímetros (mm), já os espaciais são a razão entre o volume por unidade de área (milímetros cúbicos por milímetros quadrados, mm³/mm²).

Quadro 5 - Parâmetros de textura da norma ISO 25178-2 (2012)

Macrotextura		
Parâmetro	Unidade	Descrição
S_z	mm	Altura máxima da superfície - a diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da superfície;
V_v	mm ³ /mm ²	Volume dos vazios pela quantidade de área;
V_{mc}	mm ³ /mm ²	Volume de material no núcleo com limite de 10%;
V_{vc}	mm ³ /mm ²	Volume dos vazios no núcleo com limite de 10%;
V_{vv}	mm ³ /mm ²	Volume dos vazios nos vales (referente ao limite de 80%).

Continuação do Quadro 5

Microtextura		
Parâmetro	Unidade	Descrição
S_a	mm	Altura média da superfície - média aritmética absoluta da superfície;
S_p	mm	Altura máxima de pico da superfície;
S_v	mm	Altura máxima do vale da superfície;
S_q	mm	Raiz de todas as alturas quadradas médias;
S_{pd}	1/mm ²	Densidade dos picos da superfície;
V_{mp}	mm ³ /mm ²	Volume máximo do material limitado a 10% das alturas;
S_{pc}	1/mm	Curvatura média dos picos.

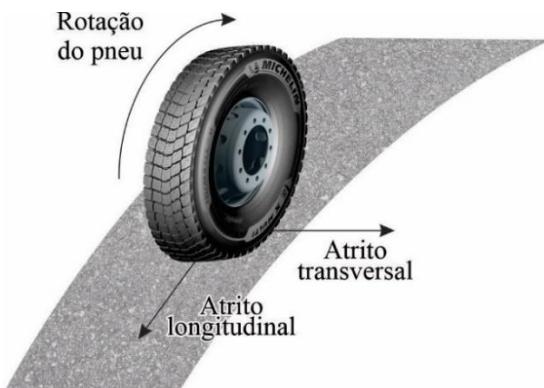
Fonte: adaptado da norma ISO 25178-2 (2012).

Nessa perspectiva, Xie *et al.* (2019) investigaram a resistência ao deslizamento em relação à microtextura do pavimento. Eles observaram que, inicialmente, a microtextura aumenta o atrito devido ao desgaste da camada superficial do ligante asfáltico pelo tráfego. No entanto, ao longo do tempo, verificou-se que há uma tendência à diminuição do atrito devido ao polimento dos agregados, fator que pode contribuir para a ocorrência de sinistros. A macrotextura está diretamente associada à distribuição granulométrica dos agregados, explicando a variação de atrito com a presença de água, o que explica a ocorrência de insegurança ao dirigir em superfícies molhadas (Wang *et al.*, 2018; Cafiso *et al.*, 2020). Dessa forma, a textura do pavimento afeta o atrito longitudinal e o transversal e o polimento dos agregados pode variar dependendo da ação do condutor e das intempéries, assim, trechos onde a aceleração e a desaceleração são evidentes podem indicar uma diferença de atrito na via, interferindo na trajetória do motorista.

Nessa mesma linha, Kordani e Molan (2015) e Nasiri *et al.* (2020) conduziram estudos de simulação, seguindo critérios de projeto geométrico e de superfície da via de acordo com a *American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO, 1994)*. Eles concluíram que a demanda de atrito transversal e longitudinal varia de acordo com o tipo de veículo, muitas vezes superando os valores estabelecidos pela norma americana. Conforme os autores, para uma velocidade de 80 km/h, a *AASHTO* recomenda um atrito lateral de cerca de 0,14, enquanto o estudo apontou a necessidade de atrito lateral de 0,15 para veículos leves e

0,19 para veículos pesados, ambos superiores aos padrões da norma (diferença de 0,01 para veículos leves e de 0,05 para veículos pesados). Além disso, os autores enfatizam que a norma não leva em consideração fatores importantes, como as mudanças de peso e dimensões dos veículos, as curvas horizontais e a orientação longitudinal, relacionados ao atrito transversal. Na Figura 17 são mostrados o atrito longitudinal e o atrito transversal envolvidos no processo de rolamento do pneu no pavimento.

Figura 17 - Forças de atrito envolvidas na rotação do pneu.



Fonte: Adaptado de Kogbara *et al.* (2016).

Conforme foi observado anteriormente, os estudos com uso de simulações resultam em contribuições consideráveis para a literatura. No entanto, é importante destacar que os levantamentos que utilizam essa metodologia não consideram fatores reais de campo, como aspectos ambientais e percepções dos motoristas em espaços reais. Assim, comprehende-se que apesar do simulador ser uma ferramenta valiosa, é necessário que esses parâmetros sejam verificados.

Buddhavarapu *et al.* (2013), por meio de análises estatísticas, investigaram a relação entre as características geométricas da via, a condição da superfície, as condições climáticas e as respostas dos condutores em curvas horizontais. O estudo contemplou dados de 22 mil sinistros em curvas horizontais, entre os anos de 2006 e 2009, no Texas - EUA. Os dados do atrito foram obtidos por meio de levantamentos históricos e a metodologia para aquisição foi a de resistência à derrapagem. Os autores observaram os seguintes aspectos: 24% dos sinistros ocorreram em trechos onde os coeficientes de atrito longitudinais são inferiores a 0,20; 52% ocorreram em locais com coeficientes entre 0,20 e 0,40 e 24% dos sinistros, em trechos com coeficientes superiores a 0,40. Na análise do estudo também é possível observar que apenas 3,2% dos sinistros excederam o limite de velocidade estabelecido no trecho.

O estudo indica que a maior porcentagem de sinistros (76%) ocorre em trechos com coeficientes de atrito inferiores a 0,40 e dentro do limite de velocidade. Esse resultado aponta que pode existir uma relação entre coeficiente de atrito em trechos de curvas horizontais e a ocorrência de sinistros. Os próprios autores afirmam que é importante entender a influência do atrito transversal nesses eventos, fato que não foi analisado no estudo. Por isso, a análise desse estudo deve ser avaliada com cautela. Os parâmetros observados no estudo de Buddhavarapu *et al.* (2013) podem ter sido afetados pelo movimento de desaceleração ou aceleração do condutor e não necessariamente o atrito exercer influência nos sinistros. Apesar de importante, pesquisas que relacionam esses fatores devem avaliar outros parâmetros para explicar os sinistros de trânsito, como exposição do condutor, traçados geométrico, condições ambientais e outros.

Apesar da relevância do estudo conduzido por Buddhavarapu *et al.* (2013), alguns aspectos adicionais podem ainda ser apontados, como os que estão relacionados ao método de coleta de dados, que foi realizado com dados adquiridos a cada 5 km de via. A opção por essa extensão pode excluir da análise zonas estratégicas, principalmente, em pontos de aceleração e desaceleração por parte do condutor (ações comuns em curvas horizontais e tangentes que antecedem as curvas) (Xie *et al.*, 2019). Sabendo disso, entende-se que a posição dos pontos de análise ao longo do trecho deve ser determinada de acordo com as ações do condutor.

Cafiso *et al.* (2020) concluíram que a variação do coeficiente de atrito longitudinal, em pistas molhadas, teve efeito significativo na segurança. Uma mudança do coeficiente de atrito de 0,65 para 0,25 elevou os sinistros em cerca de 75%. A alteração da superfície do pavimento ao longo do tempo pode estar relacionada a esse fato, onde o atrito se torna uma variável dinâmica que, com o tempo, perde sua capacidade de resistência à derrapagem. Contudo, as mesmas considerações citadas nas pesquisas de Buddhavarapu *et al.* (2013) devem ser avaliadas, como parâmetros da via e do condutor.

Montella e Imbriani (2015) enfatizam a importância de minimizar a discrepância entre o atrito transversal necessário e o existente em trechos com alto índice de sinistros, como as curvas horizontais. Porém, os autores não mencionam qual seria o valor de atrito transversal mínimo para que não ocorram os eventos. Por isso, são necessárias mais investigações relacionadas à perda de atrito ao longo do tempo, em pontos estratégicos e como isso interfere na possível mudança de trajetória do motorista ao longo do percurso.

3.3.2. Atritos Longitudinal e Transversal

Para Flintsch *et al.* (2012), mudanças na velocidade e na direção do veículo, movimentos como aceleração, frenagem e giros resultam no desenvolvimento de forças na interface pneu-pavimento. Essas forças são denominadas forças de atrito, caracterizadas como forças resistentes tangenciais presentes na interface entre o pneu e o pavimento. As forças de atrito resultam de forças externas decorrentes do movimento do veículo sobre a superfície do pavimento (Figura 7 e Figura 17). O coeficiente de atrito é a razão entre a força tangencial resistente e a força normal aplicada aos corpos (Equação 3) (Aps, 2006).

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (3)$$

Nas quais:

μ Coeficiente de atrito;

F Força de atrito;

N Força normal.

A interação pneu-pavimento tem sido investigada na literatura e os estudos apontam que esse fator pode estar relacionado com os sinistros. Em se tratando do atrito, especificamente, há convergência de que o tipo de condução aliado às ações do motorista, podem modificar as propriedades físicas da superfície de rolamento ao longo do tempo. O giro dos pneus dos veículos em movimento gera atrito e contribuem para o polimento da superfície (Flintsch *et al.*, 2012; Xie *et al.*, 2019), indicando que a rodovia pode apresentar coeficientes de atrito diferentes dependendo do ponto do traçado geométrico da estrada.

Assim como Nasiri *et al.* (2020) e Santos, Oliveira e Larocca (2022) observaram que as características dos veículos (como peso e tamanho) podem afetar o atrito entre o pneu-pavimento, corroborando com as considerações apontadas por He *et al.* (2021). Esses autores apontam uma variação das tensões desenvolvidas entre a interface pneu-pavimento para diferentes veículos. Além disso, há diferença entre fatores de atrito nos eixos, fato que possivelmente pode ocorrer devido a dinâmica do movimento e as cargas em cada eixo. Enquanto na curva à esquerda o eixo direito do veículo está submetido a maiores tensões, no sentido direito, o eixo esquerdo é o que está mais submetido às tensões.

A influência do atrito longitudinal e do atrito transversal nos sinistros de trânsito, em diferentes pontos do projeto geométrico da rodovia, não são devidamente investigados na

literatura. A própria condução do veículo pode modificar as propriedades mecânicas do pavimento, fato que pode ser relacionado às diferentes ações do motorista dependendo do traçado. Porém, a associação dessas variáveis com os sinistros tem recebido pouca atenção. Na literatura existem diferentes formas de aferir o coeficiente de atrito em superfícies. Na Tabela 6 são apresentados alguns dispositivos de medição do coeficiente de atrito e os principais parâmetros medidos.

Tabela 6 – Dispositivos para medição do coeficiente de atrito.

Equipamento	Parâmetro Medido	Ilustração Dispositivo
Skidômetro BV-8	Coeficiente de atrito longitudinal	
GripTester	Coeficiente de atrito longitudinal	
Reboque de resistência à derrapagem RWS NL	Coeficiente de atrito longitudinal	
Pêndulo SRT	Medição estacionária de coeficiente de atrito	
<i>Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM)</i>	Coeficiente de atrito transversal	
Técnica CRP (<i>Close-Range Photogrammetry</i>)	Coeficiente de atrito em todas as direções	

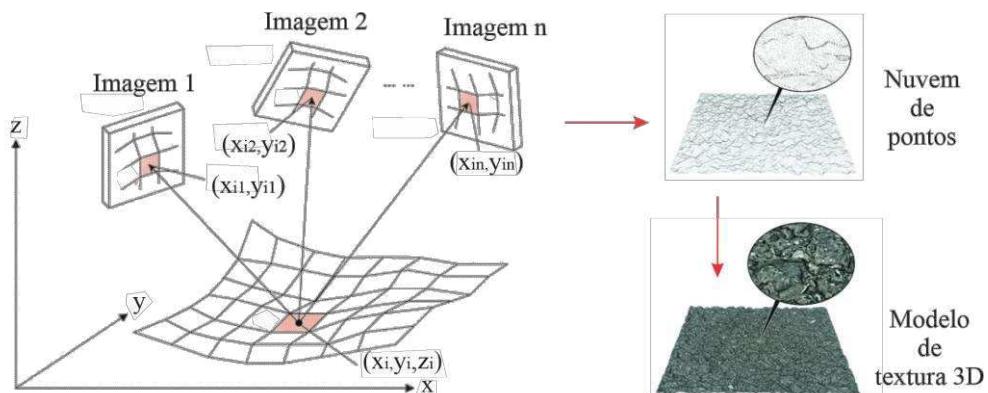
Fonte: Adaptado de Descornet *et al.* (2006), Andriejauskas *et al.* (2014), Kogbara *et al.* (2016) e Maia (2020).

Comparando os dispositivos utilizados para medição de atrito, os que aferem o atrito longitudinal têm, de modo geral, maior mobilidade em relação às demais metodologias. Os veículos podem operar em velocidades que variam entre 40 e 140 km/h. Os dispositivos para aferição do coeficiente de atrito transversal que realizam medições em velocidades médias (50 km/h), são maiores e seus custos de operação são superiores. Já os dispositivos estacionários para medição do atrito são fixos e de movimentos lentos, úteis para realizar medições em locais específicos, porém, pouco produtivos comparados aos demais (Andriejauskas *et al.*, 2014).

As técnicas convencionais para medição de atrito exigem um esforço manual para aquisição dos dados, tempo e dedicação na execução da atividade em campo. Além desses

fatores, as metodologias têm um custo relativamente alto para sua implementação. Essas circunstâncias impõem dificuldades nos levantamentos, o que pode impossibilitar o planejamento para implementar melhorias nas rodovias (Maia, 2020). Nesse sentido, pesquisas têm avançado no uso de tecnologias com o uso do Processamento Digital de Imagem (PDI) para determinar o atrito superficial de forma rápida e com baixo custo (Chen *et al.*, 2019). Os métodos que se utilizam de imagens tridimensionais para representar a superfície 3D do pavimento são baseados nos conceitos de estereoscopia e fotogrametria, que consiste na incorporação de várias imagens de diferentes ângulos para estimar coordenadas de pontos na superfície (Hartley; Sturm, 1997; Maia, 2020). Na Figura 18 é mostrado um exemplo do uso de fotogrametria para aquisição de pontos e para a construção de um modelo 3D da superfície, posteriormente.

Figura 18 – Representação da captura de uma imagem utilizando fotogrametria.



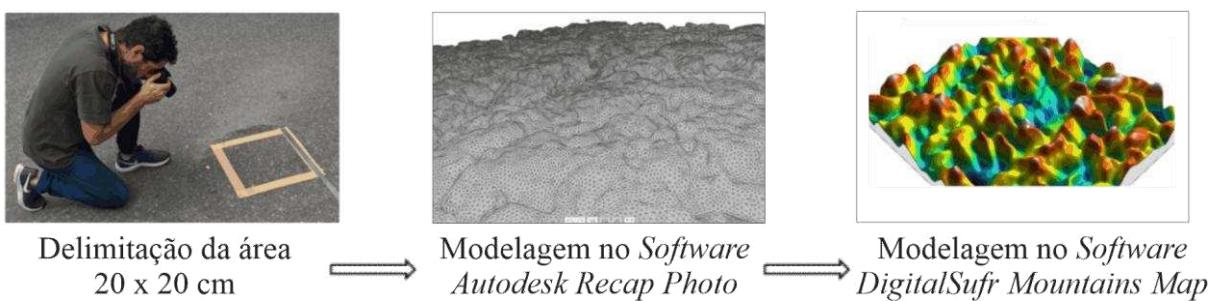
Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2020) e Maia (2020).

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia para aferir o atrito da superfície de forma prática, econômica e representativa dos resultados em campo, Maia (2020) propôs um modelo utilizando a técnica *CRP* (do inglês, *Close-Range Photogrammetry*). O método é baseado em imagens tridimensionais que utilizam conceitos de estereoscopia e fotogrametria para verificar o atrito em campo. Para atingir o objetivo proposto, o autor avaliou 8 superfícies. De cada uma dessas superfícies analisadas, foi coletado um ponto, com dimensões 20 x 20cm e foram registradas, no mínimo, 20 imagens de diversos ângulos distintos de cada ponto (Figura 18).

Para o desenvolvimento do trabalho, Maia (2020) descreve que utilizou, para o processamento dos dados, o *Recap Photo (Autodesk)*. Para geração e análise dos mapas topográficos de superfície e exportar os dados X, Y e Z, foram utilizadas as ferramentas computacionais *MeshLab*, *Gwyddion* e *MountainsMap Premium*. Após a realização desses

procedimentos, foi desenvolvido um código do MATLAB para a obtenção dos parâmetros e para a estimativa do coeficiente de atrito. Por fim, os resultados foram validados com testes clássicos tipo *SP* (*Sand Patch*), *BP* (*British Pendulum*) e *IFI-F60* (*International Friction Index*). Maia (2020) concluiu que a técnica *CRP* correlaciona-se, satisfatoriamente, com os demais modelos analisados. O citado estudo é importante para a avaliação do coeficiente de atrito. O método proposto pode auxiliar na análise do coeficiente de forma rápida e precisa. Na Figura 19 é mostrado um resumo da metodologia utilizada por Maia (2020).

Figura 19 – Método de análise *CRP*.



Fonte: Adaptado de Maia (2020).

O mesmo método foi usado por Kogbara *et al.* (2018), os autores aplicaram a técnica *CRP* para comparar o atrito em pavimento asfáltico com o método consolidado *GripTester*. Ao todo, dez pontos foram avaliados numa extensão de 900m. O software utilizado nas análises da textura também foi o *MountainsMap*. Os parâmetros da textura avaliados foram: S_q , S_a , V_{mp} , V_{mc} , S_{pd} e S_{pc} . Desses, o S_{pd} e V_{mc} (densidade dos picos da superfície e volume de material no núcleo com limite de 10%, na sequência) explicam melhor o atrito em campo, com R^2 entre 0,75 e 0,76. Como resultado, os autores propuseram que o atrito poderia ser previsto de acordo com a Equação 4:

$$0,155 + 0,1404 \cdot V_{mp} + 1,092 \cdot S_{pd} < IFI_{50\ km/h} < 0,187 + 2,656 \cdot V_{mp} + 1,834 \cdot S_{pd} \quad (4)$$

Nas quais:

IFI Coeficiente de atrito a 50 km/h;

V_{mp} Volume máximo do material limitado a 10% das alturas;

S_{pd} Densidade dos picos da superfície.

É importante destacar que os parâmetros físicos do pavimento, como coeficientes de atrito longitudinal e transversal, variam ao longo do tempo e, além disso, variam de acordo com as ações do veículo sobre o pavimento. Avaliar os parâmetros geométricos da via,

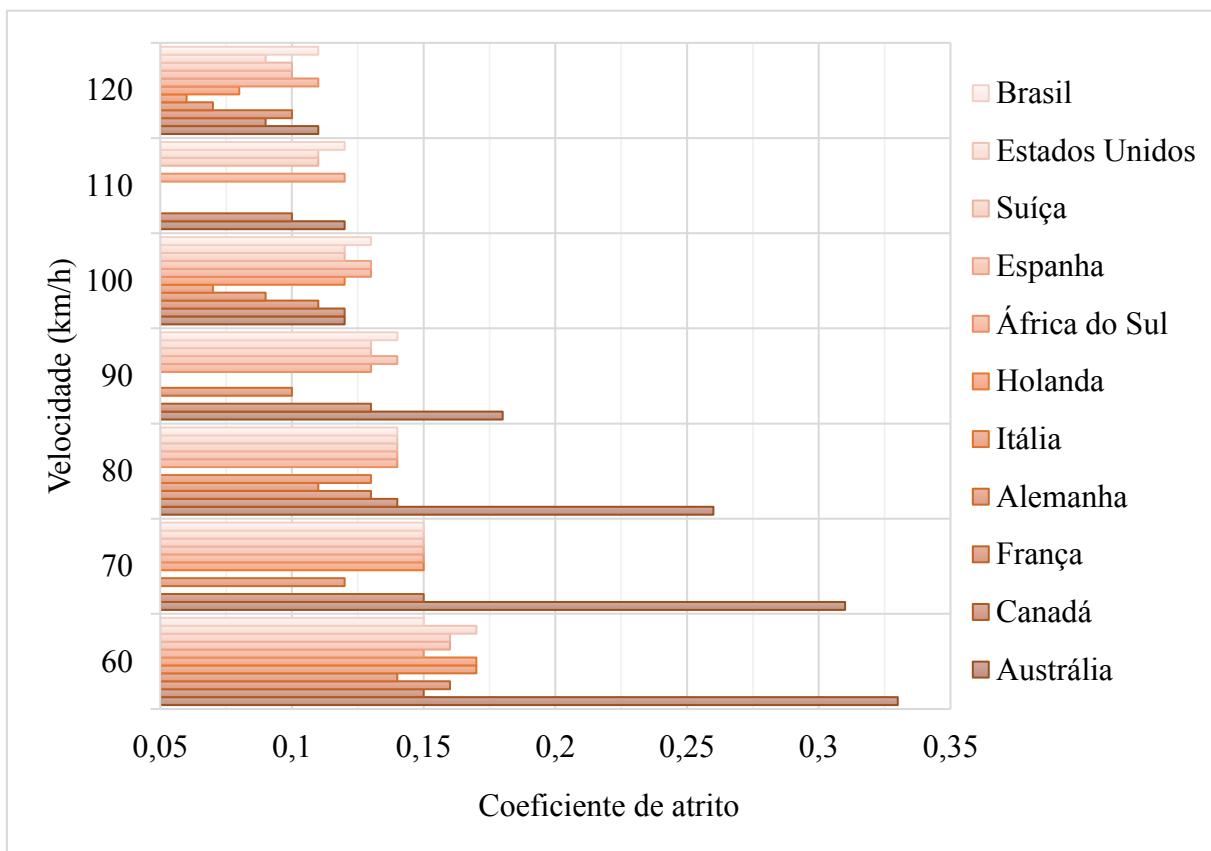
associados aos parâmetros físicos que envolvem a interação pneu-pavimento, é uma lacuna importante a ser preenchida, principalmente, envolvendo situações reais de campo.

3.4. Influência da Condição da Superfície, Curvas e Concordâncias nos Sinistros

A mudança da trajetória ideal por parte do condutor é uma variável que influencia a ocorrência de sinistros, contudo, fatores externos, também, podem interferir no padrão de condução veicular e gerar ocorrências. Com isso, correlações que envolvem os sinistros de trânsito e a geometria das rodovias têm sido discutidas na literatura. Santos, Oliveira e Larocca (2022) investigaram o comportamento dos condutores por meio de modelos de simulações virtuais para a representação da geometria real. Os autores avaliaram sete diferentes fatores: raio de curva, traçado vertical, consistência do traçado, habilidade do condutor virtual, velocidade, período do dia e peso do veículo. O coeficiente de atrito utilizado para todas as simulações foi de 0,80. Nesse estudo, foram realizadas 224 simulações, das quais 96 registraram sinistros e mostraram que a velocidade do condutor foi a variável que exerceu maior influência nas ocorrências, seguido de raio de curva e de período do dia. Os resultados do estudo indicam que os raios de curvas horizontais influenciam na variação de velocidade por parte do condutor, ocasionando uma mudança da trajetória ideal e, consequentemente, o sinistro.

No estudo citado, as variáveis mais relevantes foram: velocidade, período do dia, velocidade + período do dia, raio de curva e habilidade do motorista. É importante ressaltar que a variável “velocidade + período do dia” deve ser vista com cautela. Em situações reais, o condutor tende a realizar uma direção defensiva em períodos noturnos, imprimindo velocidades menores comparadas àquelas desenvolvidas no período diurno. Com relação ao coeficiente de atrito, 0,80 destoa dos limites de coeficientes utilizados no mundo (Figura 20).

Figura 20 - Coeficiente de atrito adotado em alguns países no mundo



Fonte: Adaptado de DNER (1999), Lamm (1999) e DER-SP (2006).

A Austrália é o país que admite o maior coeficiente de atrito entre os países analisados (Figura 20), com coeficientes de 0,33, 0,31, 0,26 e 0,18 para 60, 70, 80 e 90 km/h, respectivamente. Enquanto os demais seguem uma média de 0,16, 0,15, 0,13 e 0,13 para as mesmas velocidades. Apesar disso, o estudo de Santos, Oliveira e Larocca (2022) utilizaram coeficientes de atrito de 0,80, o que pode não representar sempre a realidade, devido ao fato de que o coeficiente de atrito elevado pode garantir maior segurança ao condutor.

A velocidade operacional dos condutores e da via tem contribuição significativa na segurança viária (Aarts; Van Schagen, 2006; Vayalamkuzhi; Amirthalingam, 2016). Considerando esse aspecto, Choudhari e Maji (2019) realizaram simulações virtuais com 41 motoristas em 26 cenários distintos. Os resultados mostraram que as vias com raios de curva inferiores a 100 m apresentam risco de colisão de 2 a 10 vezes maior do que aquelas com curvas com raios maiores. Chen *et al.* (2018) avaliaram o comportamento de 30 motoristas, também por meio de simulação, de acordo com a geometria real de uma rodovia localizada no sudoeste da China. Esses autores concluíram que os raios de curva estão diretamente relacionados à ocorrências de saídas de pistas. A análise realizada no estudo mostra que há indícios de que a

mudança da trajetória de um veículo está relacionada com os parâmetros geométricos das curvas horizontais.

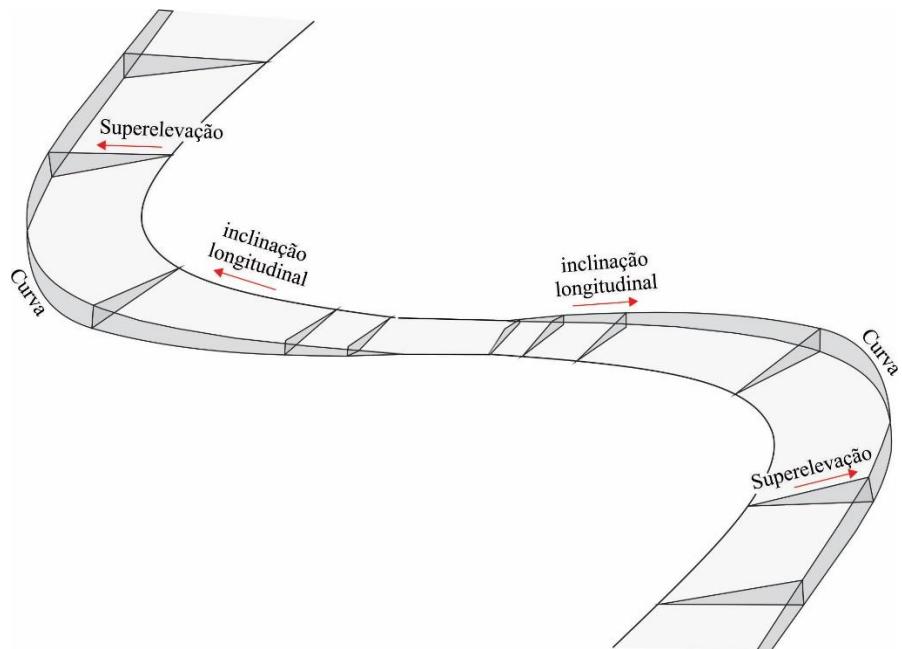
A velocidade do condutor é influenciada pela geometria da via, assim, à medida que os raios de curvas aumentam, a velocidade que o condutor desenvolve na curva tende a aumentar. Por outro lado, investigações comprovam que a velocidade do condutor, em curvas, independe do comprimento de tangentes de aproximação (Rondora; Pirdavani; Larocca, 2022). Este estudo foi realizado com 28 condutores, por meio de simulador de direção, percorrendo aproximadamente 500 km e 90 curvas horizontais. No entanto, apesar do estudo apontar não haver relação entre diminuição de velocidades em tangente e a ocorrência de sinistros, uma diminuição significativa da velocidade é o comportamento mais comum observado para as configurações com curvas de raios menores, indicando que há uma variação no padrão de condução a depender dos elementos do projeto geométrico da rodovia.

Apesar de Rondora, Pirdavani e Larocca (2022) concluírem que não há relação direta entre velocidades em tangentes e sinistros de trânsito, Montella e Imbriani (2015) destacam que, para melhorar a segurança viária, é importante reduzir a velocidade de operação das tangentes às curvas horizontais. Os autores chegaram a essa conclusão ao analisar 2.660 sinistros num trecho de 255 km de rodovia, na Itália, no período de 2007 a 2011. Para atingir as finalidades do estudo, foram utilizadas análises estatísticas para comparar tipos de sinistros, variação de velocidade ao longo do trecho, consistência do alinhamento horizontal e transversal e diferença de atrito demandado e disponível. Os resultados revelaram que a variação de velocidade e a diferença de atrito (demandado e disponível), em tangentes de aproximação e curvas horizontais, tem mais correlação com os sinistros de trânsito do que as demais variáveis analisadas. É importante destacar que, no estudo, o atrito demandado foi calculado para velocidades e parâmetros geométricos de acordo com os padrões de projeto geométrico na Itália, enquanto que o atrito disponível foi calculado de acordo com a superelevação, utilizando a mesma metodologia.

Na literatura, há divergência no que se refere à velocidade do veículo, à tangente de aproximação e às curvas horizontais. Jacob, Dhanya e Anjaneyulu (2013) avaliaram o padrão de condução dos motoristas e os dados de sinistros em 30 curvas horizontais, das quais 27 são curvas reversas (curva à direita seguida de curva à esquerda e vice e versa - conhecidas como curvas em S), conforme mostra a Figura 21. Os resultados do estudo indicaram que à medida que a diferença entre a velocidade operacional e a velocidade projetada aumenta, a

probabilidade de ocorrer um sinistro também aumenta. Na mesma linha, Wang e Wang (2018) pesquisaram a mudança de velocidade em curvas horizontais e verticais combinadas e constataram que há relação entre os comportamentos de mudança de velocidade e tipos de curva das vias.

Figura 21 - Curva horizontal reversas (curva em S).



Fonte: Adaptado do DNER (1999).

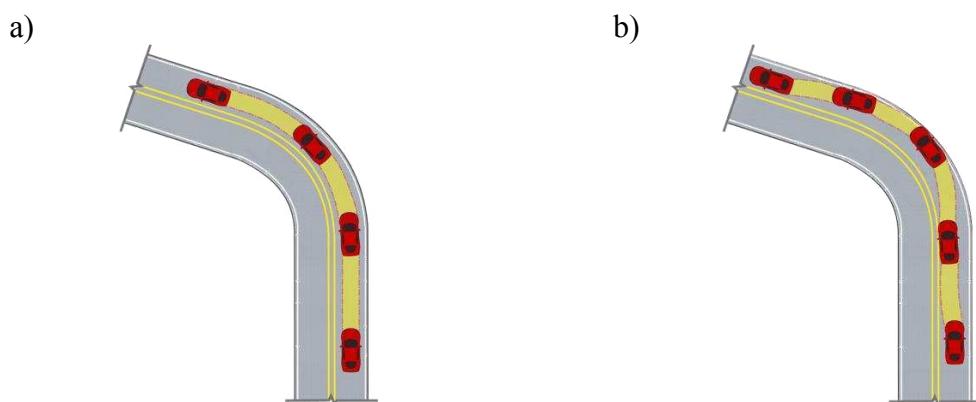
Nessa mesma linha, Santos, Oliveira e Larocca (2022) investigaram os sinistros de trânsito numa rodovia brasileira, entre os anos de 2009 e 2015. Esse estudo avaliou 20 curvas com raios entre 130 e 625 m e verificou que apenas duas curvas foram responsáveis por 50% dos sinistros, com raios iguais a 130 m. Além disso, verificaram que os sinistros em curva aconteceram, na ampla maioria, em curvas reversas, sendo responsáveis por 87,5% das ocorrências. Em outra perspectiva, Montella e Imbriani (2015) apontam que a comparação entre curvas circulares simples e curvas reversas devem ser analisadas com cautela, visto que, nas curvas circulares simples, a variação de velocidade tende a ser brusca devido a variação repentina do traçado (longa tangente seguida de curva). Porém, em curvas reversas, a variação de velocidade é menor. Este fato pode indicar maior possibilidade de sinistros em curvas circulares simples em relação às curvas reversas.

No Brasil, pesquisas têm mostrado resultados semelhantes, como a de Bobermin e Ferreira (2021) que avaliaram 488 sinistros de trânsito envolvendo perda de controle, entre os anos de 2017 e 2019, em três rodovias rurais no sul do Brasil. Os cenários onde ocorreram os

eventos foram projetados e testados em um simulador de direção e apontaram para uma maior frequência de sinistros em trechos onde há curvas horizontais com elevado ângulo central (superior a 45°) e raio entre 120 e 450 m. Os autores ainda concluíram que a frequência de curvas horizontais seguidas de tangentes inferiores a 250 m também está associada aos sinistros.

Dessa forma, de acordo com investigações, há indícios de que a mudança da trajetória ideal do veículo, provocada pelo desvio da velocidade, pode estar associada aos parâmetros geométricos da via, como trechos em tangentes anteriores às curvas, curvas circulares e consistência entre alinhamentos horizontais e verticais. Contudo, devido à complexidade das variáveis, não há um entendimento conciso sobre como esses parâmetros estão diretamente relacionados aos sinistros. Nesse sentido, Montella e Imbriani (2015) destacam que nem sempre é viável realizar melhorias no projeto geométrico de rodovias existentes a fim de reduzir as inconsistências de projeto, medida essencial para reduzir os sinistros de trânsito. Os autores citam que é necessário ter um controle eficaz no gerenciamento da velocidade de operação para trechos inconsistentes, adaptando-se à geometria da rodovia. Na Figura 22 são mostradas: a) trajetória ideal e b) desvio de trajetória imposta pelo motorista.

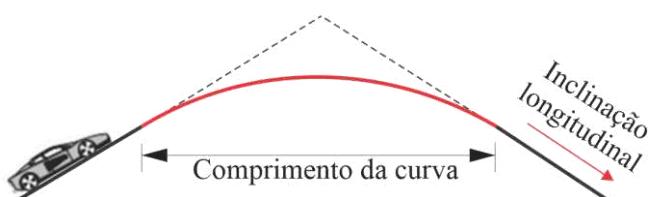
Figura 22 - Trajetória realizada pelo condutor. a) trajetória ideal e b) desvio da trajetória ideal



Fonte: Autor.

O alinhamento vertical de uma rodovia é tão importante quanto o alinhamento horizontal, visto que as distâncias de visibilidade de parada e de ultrapassagem são estabelecidas utilizando critérios verticais da via. Em terrenos montanhosos, por exemplo, há a necessidade de aclives e declives, por isso, torna-se inevitável a concordância curvilínea na interseção de duas rampas (Figura 23) (Antas *et al.*, 2010).

Figura 23 - Esboço de uma curva vertical.



Fonte: Adaptado de Pontes Filho (2013).

As curvas verticais também podem estar relacionadas com sinistros de trânsito. Com isso, comprehende-se que inconsistências em projeto e a concordância equivocada entre alinhamentos horizontal e vertical têm impacto significativo na segurança viária (Hassan; Easa, 2003; Jung *et al.*, 2018). No que se refere ao projeto geométrico, o DNER (1999) estabelece alguns critérios de elevações máximas de acordo com a classe da via (Tabela 7).

Tabela 7 - Rampas máximas (%) de acordo com o relevo.

Classe de projeto	Rampas máximas (%)		
	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	3,0	4,0	5,0
Classe I	3,0	4,5	6,0
Classe II	3,0	5,0	7,0
Classe III	4,0	6,0	8,0
Classe IV - A	4,0	6,0	8,0
Classe IV - B	6,0	8,0	10,0

Fonte: Adaptado do DNER (1999).

O DNER (1999) determina as rampas máximas (%) com relação ao relevo (dividido em plano, ondulado e montanhoso) e as classes de projeto (Tabela 7). A definição da superelevação vai desde a Classe 0 até as classes IV-A e IV-B. A classe 0 representa as vias expressas, com Volume Médio Diário (VMD) acima de 2.600 veículos, rampas máximas variando 3, 4 e 5% de acordo com o relevo, sequencialmente. As classes IV-A e IV-B são rodovias de pista simples com o VMD entre 50 e 200 e menor que 50, respectivamente. As rampas máximas variam entre 4 e 8% para a Classe IV-A e entre 6 e 10% para a Classe IV-B (Quadro 4). À medida que o VMD aumenta, as rampas máximas tendem a diminuir, o que pode estar relacionado à segurança da via.

Llopis-Castelló *et al.* (2019) afirmam que há vários métodos para avaliar a consistência do projeto geométrico. Eles podem ser baseados na velocidade de operação,

estabilidade do veículo, índices de alinhamento e carga de trabalho de motorista. Contudo, a maioria dos métodos se baseiam entre a diferença de velocidade de projeto e velocidade operacional e pode não refletir a realidade atual, aspectos como dinâmica dos veículos e condições das rodovias possivelmente são diferentes para cada região. Nesse mesmo contexto, os autores afirmam que há dois modelos de consistência: local e global. O global se baseia na análise da variação do alinhamento como um todo, já os modelos locais, avaliam pontos específicos do alinhamento, como reduções repentinas de velocidade. Com base nisso, as avaliações locais podem ser importantes para investigar pontos específicos, como curvas horizontais.

Dhahir e Hassan (2018) desenvolveram um modelo de análise do que chamaram de “limite de conforto do motorista”. Para os autores, o condutor se sente confortável quando está realizando um alinhamento curvo em velocidade constante. O estudo foi realizado em 62 curvas horizontais com raios variando entre 146 e 873 m. O número total de viagens nessas curvas foi de 3.700, aproximadamente.

As investigações conduzidas por Dhahir e Hassan (2018) definiram um limite de aceleração entre -0,10 e +0,10 m/s² para que a variável fosse considerada constante. Além disso, os dados de igualdade foram avaliados, também, pelo teste estatístico ANOVA com significância de 0,05. Para cada curva, os autores avaliaram as médias das mínimas acelerações transversais enquanto o condutor realizava o trajeto em velocidade constante. Como resultado, o estudo indicou que 0,15 g era uma aceleração lateral aceitável para o conforto do motorista.

Apesar de importante, o método desenvolvido por Dhahir e Hassan (2018) foi realizado em pista de duas faixas. No Brasil, cerca de 85% das rodovias são de pista simples de mão dupla (CNT, 2023). Nesse contexto, os aspectos de velocidades e acelerações transversais podem ser diferentes para essa realidade, por esse motivo, é importante avaliar os métodos considerando esse tipo de cenário.

Posterior a esse estudo, Dhahir e Hassan (2019a) realizaram uma pesquisa em curvas horizontais com base na avaliação quantitativa do desempenho da segurança do condutor. Para isso, foi realizada uma modelagem de comportamento do motorista, que envolvia *Naturalistic Driving Study (NDS)* da cidade de Washington (EU), disponibilizados pelo *Washington State Department of Transportation (WSDOT)* e *Highway Safety Information System (HSIS)*. Os dados de atrito (para o período de 2007 a 2014) foram disponibilizados pelo

Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP). Os parâmetros fornecidos e utilizados na modelagem incluíam geometria da rodovia, limites de velocidade e volume do tráfego para as 232 curvas selecionadas. Com relação aos dados do condutor, foram disponibilizadas velocidade, aceleração lateral e aceleração longitudinal.

O estudo citado foi dividido em algumas etapas. Inicialmente, foram realizadas simulações computacionais no *Software CarSIM* para avaliar o atrito lateral exigido e a aceleração lateral aplicada para veículos de passeio em curvas horizontais, com o intuito de verificar o desempenho dinâmico dos veículos. As principais variáveis foram raio de curva (entre 68 e 336 m), inclinação longitudinal (+10% a -10%), velocidade (entre 40 e 120 km/h) e taxa de superelevação (6% a 10%). As simulações resultaram no modelo mostrado nas equações 5 e 6, com o parâmetro estatístico $R^2=0,999$ e $R^2=0,957$ para o atrito lateral demandado, respectivamente.

$$fd = \frac{0,009 \cdot V_{BC}^{1,879}}{R^{0,886}} - 0,947 \cdot e^{0,928} + 2,6 \cdot 10^{-5}x G \quad (5)$$

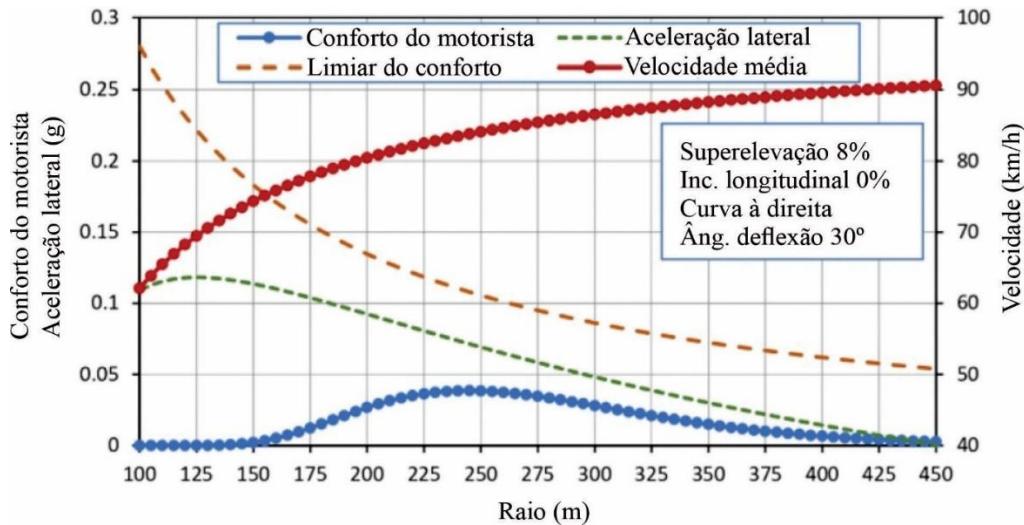
$$a_D = \frac{0,011 \cdot V_{MC}^{1,559}}{R^{0,655}} + 0,032 \cdot e^{0,700} - 4,3 \cdot 10^{-4}x G \quad (6)$$

Nas quais:

- fd Atrito lateral demandado;
- a_D Aceleração lateral demandada;
- V_{BC} Velocidade do veículo no início da curva (km/h);
- V_{MC} Velocidade do veículo no meio da curva (km/h);
- R Raio da curva (m);
- e Taxa de superelevação (m/m);
- G Inclinação vertical (%).

Posteriormente, os resultados dos modelos de atrito lateral (fd) e aceleração lateral (a_D) demandados foram avaliados com os *NDS* disponíveis no estudo. Os detalhes relacionados aos *NDS* como: raios de curva horizontal, velocidades de projeto, superelevação e aceleração lateral não são mostrados com mais detalhes na pesquisa, contudo, o estudo resultou na avaliação mostrada na Figura 24.

Figura 24 - Relação entre o conforto do motorista e raio de curva.



Fonte: Adaptado de Dhahir e Hassan (2019a).

De acordo com a Figura 24, à medida que o raio da curva aumenta, a velocidade também aumenta, o que é esperado e demonstrado na literatura. Os autores mencionam que em curvas horizontais acentuadas (raios inferiores a 140 m), a velocidade e aceleração lateral são baixas e, portanto, o conforto do motorista também tende a ser baixo. À medida que o raio da curva aumenta, até o limite de 240 m, o conforto do motorista também aumenta, porém, volta a diminuir para raios superiores a 240 m. A explicação mostrada no estudo é que as diferenças nas taxas de alteração desses parâmetros afetam o conforto do motorista, resultando no seu comportamento não linear. Dhahir e Hassan (2019a) ressaltam que na Figura 24 estão complementadas as variáveis discutidas no estudo. À medida que a velocidade aumenta, o atrito lateral disponível diminui e o atrito lateral demandado aumenta, o que pode gerar menos estabilidade ao veículo.

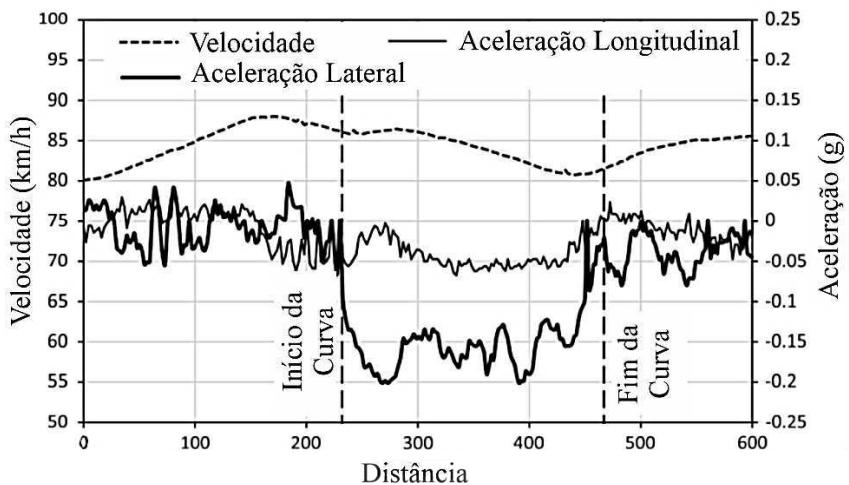
No mesmo ano (2019), Dhahir e Hassan (2019b) publicaram um outro estudo intitulado *Modeling Speed and Comfort Threshold on Horizontal Curves of Rural Two-Lane Highways Using Naturalistic Driving Data*. Os dados também envolviam o NDS da cidade de Washington (EU), disponibilizados pelo *Washington State Department of Transportation (WSDOT)* e *Highway Safety Information System (HSIS)*. No estudo, os autores utilizaram NDS para modelar as distribuições de velocidade e o limite de conforto em curvas horizontais de rodovias rurais de duas pistas.

A investigação foi conduzida em 36 curvas em terreno ondulado e 29 curvas em terreno montanhoso, com raios variando entre 158 e 763 m. A finalidade do estudo foi avaliar

somente curvas independentes, com tangente de aproximação mínima de 200 m em curvas isoladas e 400 m em curvas sucessivas. E esses limites foram baseados em *FHA* (2000). O estudo foi elaborado com 2.874 e 2.316 viagens em curvas onduladas e montanhosas, respectivamente. As viagens foram conduzidas por 178 motoristas, destes, 98 homens e 80 mulheres com idades entre 16 e 80 anos (os motoristas com idades entre 20 e 24 anos são maioria, com 25% do total). É importante mencionar que o estudo foi elaborado apenas com amostras coletadas durante o dia e em condições climáticas favoráveis, com terreno seco.

Os dados avaliados no estudo de Dhahir e Hassan (2019b) incluíam velocidades instantâneas no início, meio e fim da curva, velocidade média, velocidades mínima e máxima na curva, e velocidade instantânea à 200 m anterior ao início da curva. O objetivo da pesquisa foi avaliar como a velocidade está associada ao conforto. Os autores definem que o conforto do motorista está relacionado às ações de desacelerar quando se aproxima de uma curva, com base em sua percepção da curvatura à frente. Na Figura 25 é mostrado um gráfico de velocidade e aceleração ao longo de uma curva.

Figura 25 - Exemplo de comportamento de direção em curvas horizontais.



Fonte: Adaptado de Dhahir e Hassan (2019b).

A Figura 25 indica que, no início na tangente de aproximação, o motorista começou a desacelerar, entrou na curva com a velocidade relativamente alta (88 km/h) e continuou a desacelerar para atingir a velocidade mínima na curva (velocidade de 80 km/h). No início da curva a aceleração longitudinal era de 0 \times gravidade (g), e atingiu o máximo de -0,05 g, enquanto a aceleração lateral no início da curva era de 0 g e atingiu o seu máximo de -0,20 g. Segundo os autores, essa diferença num curto espaço de distância (240 m de curva), indica desconforto para o motorista.

Para desenvolver um modelo estatístico com a finalidade de avaliar a relação entre raio da curva, ângulo de deflexão da curva, velocidades e limiar do conforto do condutor, Dahir e Hassan (2019b) utilizaram testes estatísticos de ANOVA para obter relações entre as variáveis. Como resultado, os autores desenvolveram os modelos estatísticos mostrados nas equações 6, 7, 8 e 9, com o parâmetro estatístico R^2 igual a 0,829, 0,829, 0,843 e 0,652, respectivamente.

$$V_{MC} = 80,352 - \frac{3289,296}{R} + 0,261 \cdot VL + 5,969 \cdot T \quad (6)$$

$$V_{crv,máx} = 83,711 - \frac{2914,397}{R} + 0,230 \cdot VL \quad (7)$$

$$V_{crv,mín} = 69,153 - \frac{2620,988}{R} + \frac{100,391}{\Delta} + 0,230 \cdot VL + 5,158 \cdot T \quad (8)$$

$$a_L = 0,103 + \frac{41,332}{R} - \frac{12,794}{VL} + 5 \cdot 10^{-4} \times \Delta + 0,029 \cdot D + 0,021 \cdot T \quad (9)$$

Nas quais:

V_{MC} Velocidade no meio da curva (km/h);

$V_{crv,máx}$ Velocidade máxima na curva (km/h);

$V_{crv,mín}$ Velocidade mínima na curva (km/h);

a_L Aceleração lateral mínima (km/h);

V_L Limite de velocidade (km/h);

Δ Ângulo de deflexão ($^{\circ}$);

T Terreno ondulado (0) e montanhoso (1);

D Direção da curva: esquerda (0) ou direita (1);

R Raio da curva (m).

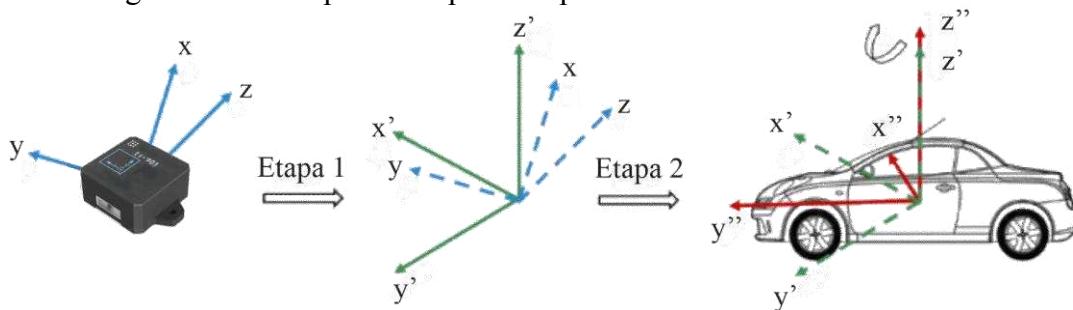
O nicho de pesquisa envolvendo a influência das curvas, concordâncias e sinistros de trânsito é amplo. A diversidade de variáveis envolvidas torna o problema complexo. No entanto, a utilização de simuladores de direção para avaliar diferentes variáveis, e como os condutores respondem a cada uma delas, tem sido a principal estratégia adotada (Chen *et al.*, 2018; Choudhari; Maji, 2019; Rondora; Pirdavani; Larocca, 2022; Santos; Oliveira; Larocca, 2022). Contudo, apesar do simulador de direção ser uma ferramenta útil para avaliar a resposta dos condutores aos elementos geométricos da via, ele não representa, necessariamente, o ambiente real no qual o condutor está realizando a trajetória. A obtenção de dados de campo é fundamental para compreender melhor esse problema e validar as simulações.

3.5. Utilização de Sistemas Embarcados para Avaliação da Segurança Viária

Analizar o comportamento do motorista ao longo de uma trajetória pode auxiliar na compreensão do fenômeno envolvendo sinistros, contudo, pesquisas realizadas em campo e em condições reais são desafiadoras, devido a impossibilidade de controlar variáveis, que tornam as investigações complexas. A tecnologia tem sido uma aliada cada vez mais importante para tentar explicar os sinistros de trânsito. Estudos têm sido conduzidos utilizando sistemas embarcados em veículos, que são capazes de detectar a condição da superfície e o comportamento do motorista em diferentes situações (Wu *et al.*, 2020).

A utilização de tecnologias, como *Inertial Measurement Unit (IMU)* para aquisição de dados de deslocamento e de orientação mostra-se promissora (Seel; Ruppin, 2017). Os IMUs são dispositivos que integram um conjunto de sensores (acelerômetros, giroscópios e magnetômetro) capazes de coletar medições tridimensionais de aceleração, movimento e inclinações angulares (Madgwick, Vaidyanathan; Harrison, 2010; Seel; Ruppin, 2017; Zhang *et al.*, 2022). Na Figura 26 é mostrado um esboço do funcionamento de um dispositivo para coletar informações de deslocamentos.

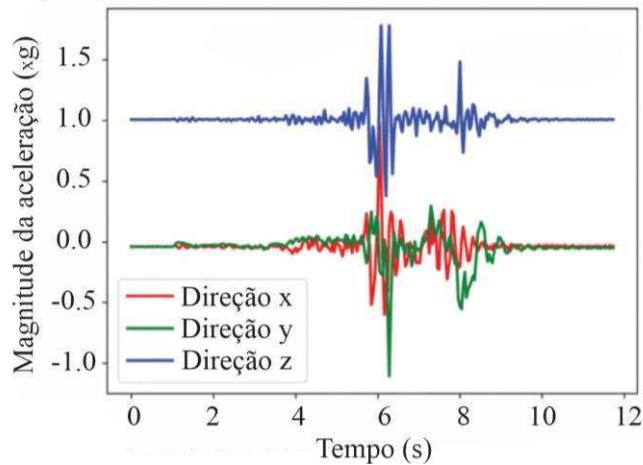
Figura 26 - Exemplo de dispositivo para coleta do deslocamento nos três eixos.



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2020).

Os sistemas embarcados são ferramentas que podem auxiliar na análise de como o comportamento do motorista é afetado pela geometria da via. Os aspectos de localização e velocidade tornam-se aliados para compreender o padrão de condução. Para além disso, os sistemas também podem ser utilizados para avaliar a integridade da superfície do pavimento (Paixão, 2021), verificação que só é possível devido à sensibilidade da variação das velocidades nos eixos X, Y e Z. Neste contexto, diversos tipos de sensores são utilizados para detecção de defeitos em pavimentos, como os acelerômetros, dispositivos a laser, câmeras, microfones, GPS, plataformas com sensores integrados, dentre outros (Alrajhi *et al.*, 2023). Na Figura 27 é mostrado um exemplo de aquisição da aceleração por espaço de tempo nos três eixos.

Figura 27 - Exemplo de gráfico com dados adquiridos do acelerômetro.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2022).

Os acelerômetros de baixo custo, para o monitoramento da infraestrutura viária, também estão sendo utilizados. A fusão de diferentes sensores aprimora a qualidade do sinal e, consequentemente, os resultados multidimensionais sobre a estrutura do pavimento, detectando com maior precisão os danos na superfície analisada (Uus *et al.*, 2016). Nessa perspectiva, pesquisas buscam aperfeiçoar os sistemas de detecção de defeitos em pavimentos. Mazzei e Di Lellis (2022) desenvolveram um sistema de monitoramento baseado em acelerômetros dinâmicos, capaz de aferir aceleração dinâmica nos eixos X, Y e Z.

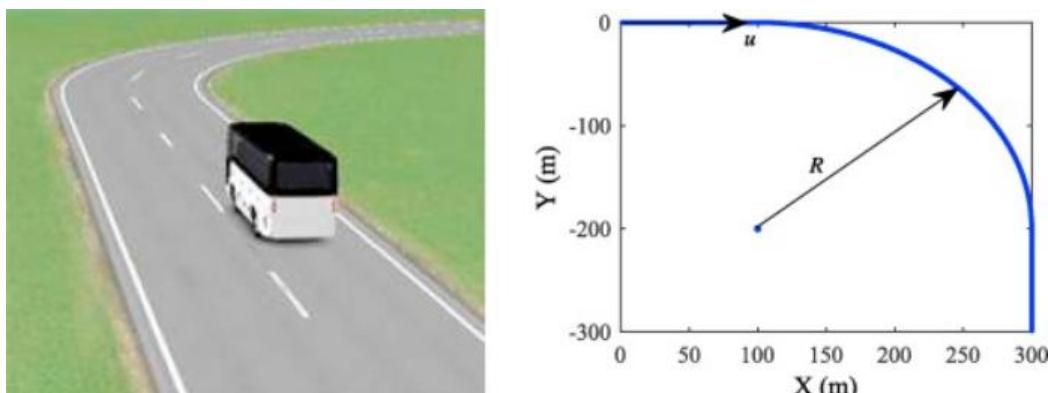
Os sistemas embarcados também são utilizados para investigar trajetórias impostas pelo motorista, com o auxílio de dispositivos *smartphones*. A integração do sistema *Global Navigation Satellite System (GNSS)* e de acelerômetros integrados tornam os dispositivos úteis para a realização de levantamentos e de aquisições de dados. Para além desses fatores, a utilização dos dispositivos, pela maior parte da população, transforma o sistema numa grande base de dados de aquisição constante (Costa; Baldo, 2015; Arman; Tampère, 2022).

Apesar do avanço no contexto do georreferenciamento, a pesquisa de Costa e Baldo foi realizada em 2015. Atualmente, a tecnologia da geoespecialização avançou significativamente. Estudos como o de Arman e Tampère (2022) investigaram os movimentos de mudança de faixa dos motoristas (variação lateral). Os autores também desenvolveram algoritmos capazes de tratar dados georreferenciados, aplicar correções e obter a trajetória do motorista. Para a coleta dos dados dos usuários, foram utilizados os aplicativos *Touring Mobilis*, *RTL Traffic* e *Flitsmeister* para *smartphones*, os estudos foram realizados numa rede localizada na Bélgica. Como resultado, os autores avaliaram que 90% dos pontos coletados

estavam dentro da via onde realmente o veículo trafegava. Esses resultados indicam o avanço na tecnologia e aquisição de dados georreferenciados.

Com isso, percebe-se que o uso de aplicativos de *smartphone*, sensores internos e sistemas de desenvolvimentos têm contribuído para a geração de resultados valiosos no que tange à análise das trajetórias de veículos e de suas variações. Em uma outra perspectiva para o uso de aplicativos, Chu *et al.* (2018) desenvolveram um modelo para previsão de velocidades críticas em curvas para ônibus. Os autores realizaram simulações nos softwares *TruckSim* e *MATLAB/Simulink* apenas para ônibus (Figura 28). Os raios de curvas variaram entre 50 e 300 m e o atrito foi fixado em 0,90.

Figura 28 - Modelo experimental e curva da via para o modelo proposto.



Fonte: Adaptado de Chu *et al.* (2018).

Os autores avaliaram que, para manter a segurança em curvas, a velocidade lateral ao longo da curva deve ser inferior a 0,63 vezes a gravidade. Uma contribuição significativa do estudo demonstra que há uma forte relação entre a tendência de capotamento do modelo proposto e a variação de velocidade lateral desenvolvida pelo motorista. As investigações apontaram que a variação da aceleração lateral de 0 para 0,70 g (gravidade) eleva o índice de capotamento de 0 para 0,72 (numa escala de 0 a 1, onde 1 é o limite para o capotamento).

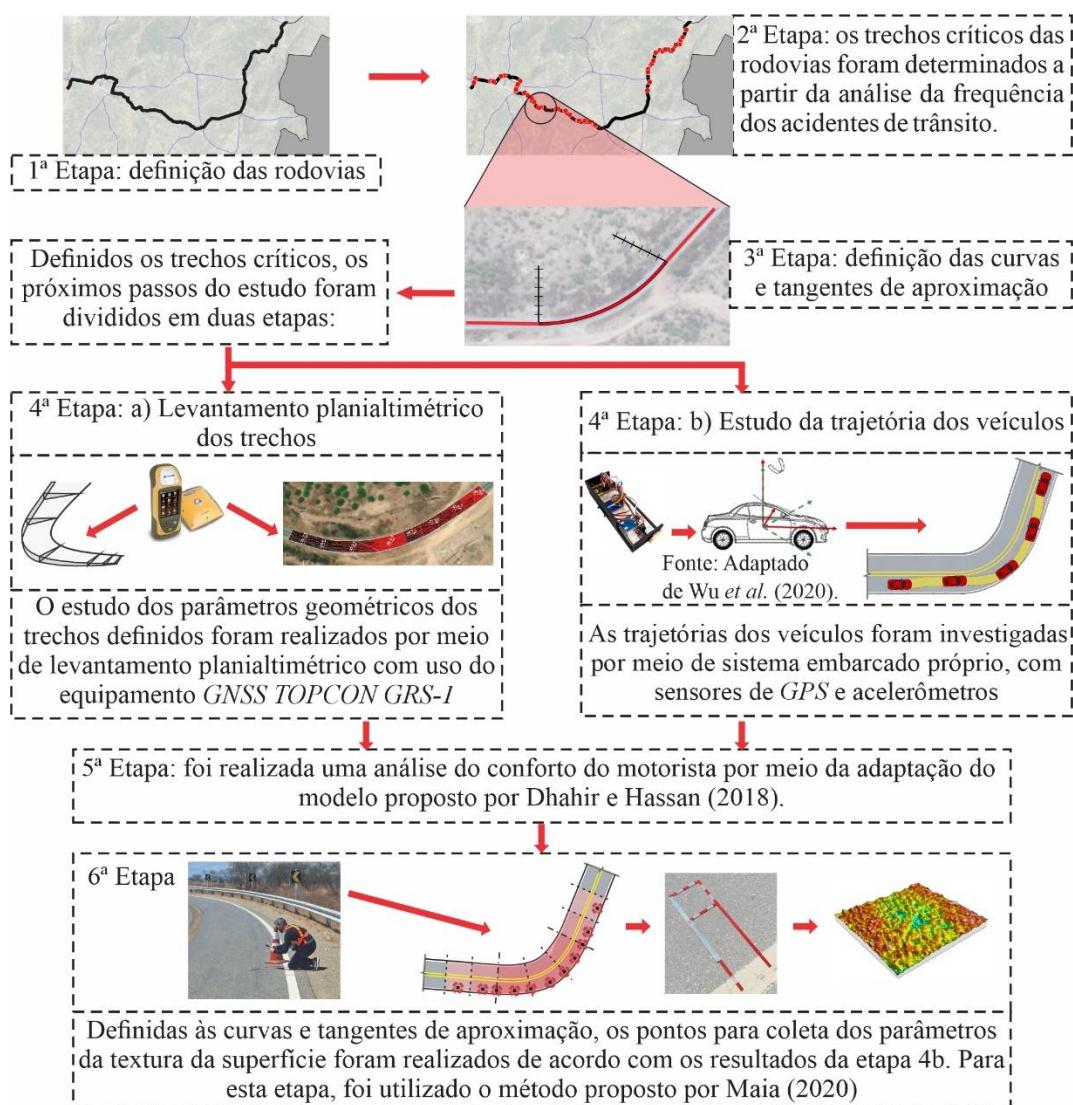
É importante mencionar que o coeficiente de atrito utilizado nas simulações de Chu *et al.* (2018) foi fixo (0,90), o que pode não representar situações reais de campo, principalmente, para os resultados que apontam variação de velocidade lateral, onde há desgaste do pavimento devido ao rolamento dos pneus. Apesar da contribuição significativa do estudo, mais investigações com diversos tipos de veículo devem ser realizadas a fim de entender o fenômeno envolvendo sinistros de trânsito.

A utilização de simuladores de direção tem avançado, no entanto, os resultados se limitam a ensaios virtuais e podem não reproduzir situações reais de campo. Em outra linha, sistemas embarcados são utilizados para investigar padrões de condução e condição de superfície. Nessa temática, a realização de estudos reais em campo com a utilização de sistemas embarcados pode ter um avanço promissor, tanto para compreender as variáveis envolvidas, quanto para explicar os sinistros de trânsito.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo tem como principal objetivo investigar como a geometria da via interfere na condução do motorista e, como consequência, na superfície do pavimento. Por meio dessa correlação será possível propor estratégias para aumentar a segurança veicular especialmente nas curvas horizontais. Para atingir o objetivo proposto, foi realizada uma pesquisa de caráter descritivo com procedimentos técnicos experimentais em trechos de uma rodovia localizada no estado do Rio Grande do Norte (RN). De acordo com os dados históricos de sinistros, foram selecionadas e avaliadas curvas horizontais nos trechos em estudo. Na Figura 29 é apresentado um fluxograma que sintetiza as etapas metodológicas que foram realizadas neste estudo.

Figura 29 - Etapas metodológicas do estudo.



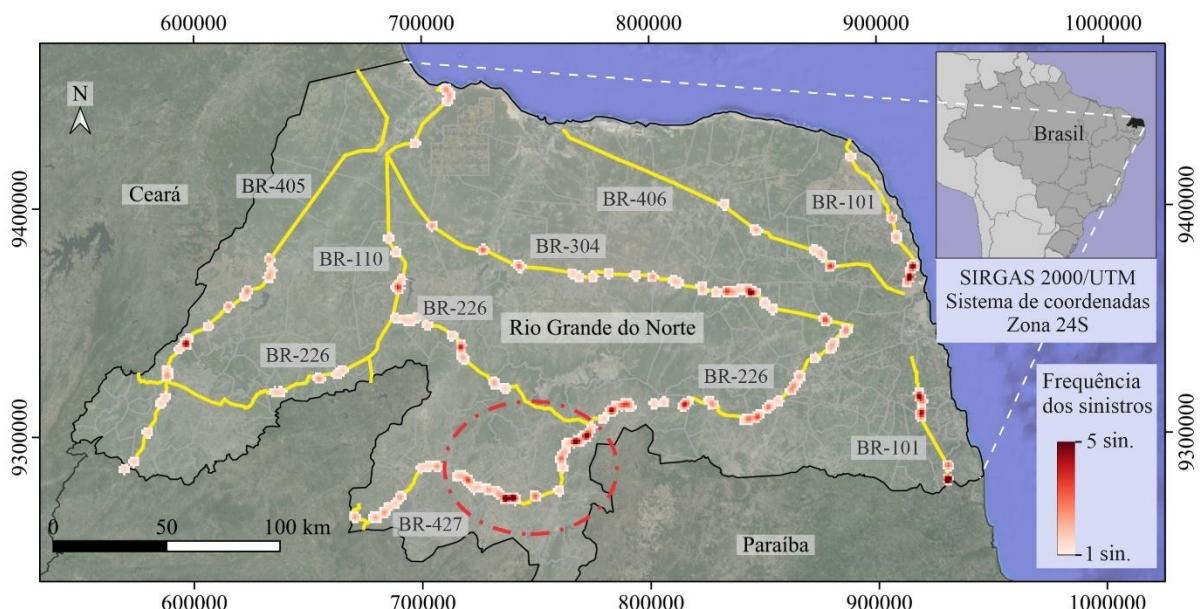
Fonte: Autor.

4.1. Definição da Rodovia

O estado do Rio Grande do Norte (RN) tem uma área de aproximadamente 53.000 km² e possui 167 municípios com 815 km² de área urbanizada e 3.302.739 habitantes (IBGE, 2022). Para determinar os trechos do estudo, foram analisados os sinistros de trânsito de todas as rodovias federais do RN, entre os anos de 2017 e 2022. O período foi escolhido devido à facilidade de acesso e tratamento dos dados referentes aos sinistros, disponível no portal do Ministério da Justiça e Segurança Pública (Brasil, 2023).

Para avaliar uma amostra representativa do estudo proposto, foram excluídos os trechos das rodovias e os sinistros que ocorreram na zona urbana. Posteriormente, foram investigados os sinistros de trânsito ocorridos em curvas horizontais e em ambientes rurais (apenas os sinistros relatados como ingestão de álcool foram excluídos da amostra). Entre os anos de 2017 e 2022, ocorreram 292 sinistros de trânsito em curvas nas sete rodovias do RN. Na Figura 30 é mostrado um mapa da localização do estado do RN e os sinistros por rodovia.

Figura 30 – Localização do estado do Rio Grande do Norte e os sinistros nas rodovias federais entre 2017 e 2022.



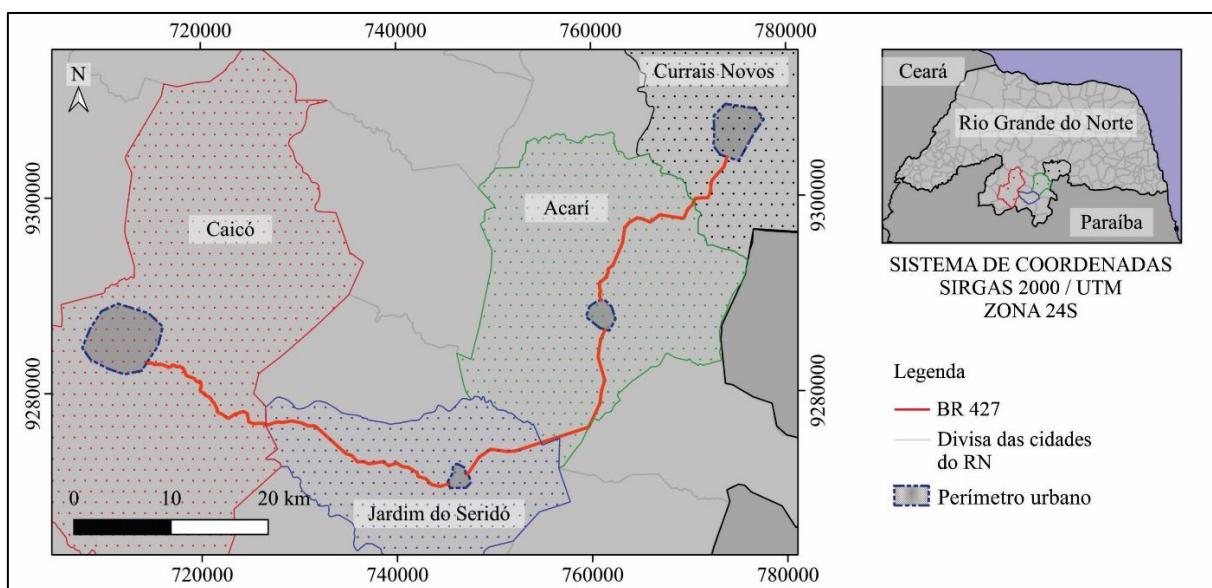
Fonte: Autor.

Dentre as sete rodovias federais, a BR-427 foi a que apresentou mais pontos de concentração de sinistros em curva, ela é responsável por conectar os dois municípios mais populosos da região do Seridó Potiguar: Caicó e Currais Novos, com 61.146 e 41.318 habitantes, respectivamente. A extensão destacada na Figura 30 é um recorte de um trecho

maior, que se estende da cidade de Caicó até Natal (capital do Estado). A cidade de Currais Novos é o ponto intermediário deste trajeto.

Diante da importância regional e do alto índice de sinistros, o estudo será realizado na BR-427. O trecho compreende apenas áreas rurais entre as cidades (excluindo trechos da rodovia em perímetro urbano), totalizando 86 quilômetros de rodovia. Para além da importância regional das cidades, existem indícios de muitos sinistros nos trechos, como noticiado no portal Estradas (2021), a título de exemplo. Curvas horizontais e regiões montanhosas são as principais menções citadas pelos motoristas. Na Figura 31 é apresentado o trecho da BR-427 que será base para o estudo.

Figura 31 - Trecho da rodovia BR-427 – descrição da área do estudo de caso



Fonte: Autor.

4.2. Caracterização dos Sinistros de Trânsito e Trecho em Estudo

Um estudo inicial, a ser publicado nos anais da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), no 37º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, foi elaborado a fim de caracterizar os sinistros de trânsito ocorridos na BR-427/RN (Pereira *et al.*, 2023).

Para esta etapa da pesquisa, foram utilizados dados de sinistros de trânsito na BR-427/RN entre os anos de 2013 e 2022. Na Figura 32 é mostrado um fluxograma da aquisição dos dados. Para o estudo, foram analisados sinistros de trânsito em curvas, portanto, foram excluídas condições que pudessem influenciar na condução do veículo e não retratassem, precisamente, o elemento geométrico “curva” como o principal fator relacionado aos sinistros.

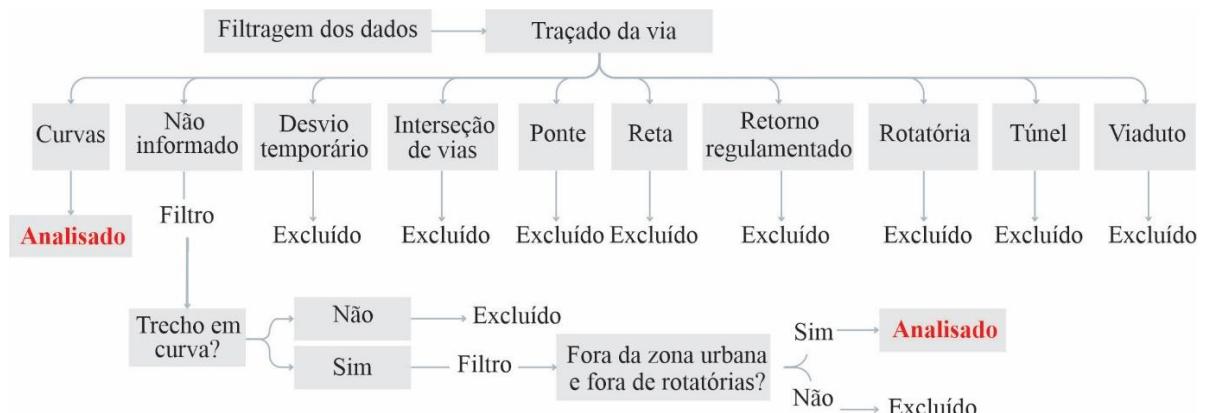
Para tanto, foi necessário realizar uma filtragem dos dados disponíveis, conforme exposto no fluxograma da Figura 33.

Figura 32 - Fluxograma de aquisição dos dados.



Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Figura 33 - Fluxograma de filtragem dos dados.



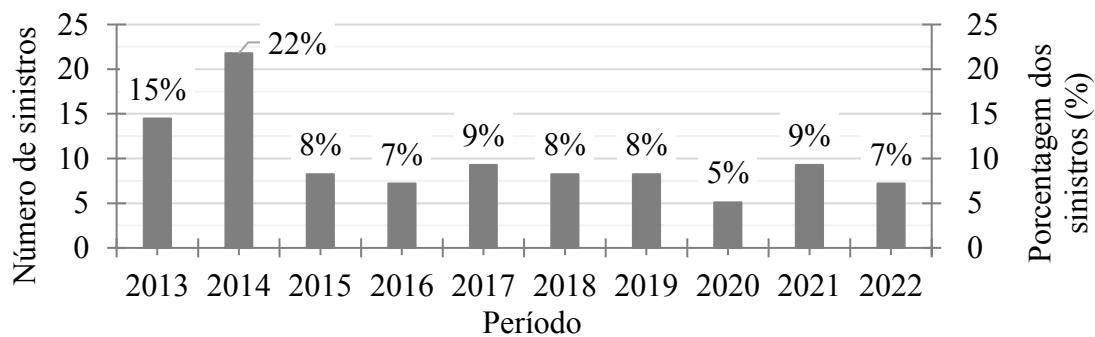
Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Os traçados da via analisados são: “curvas” e o item “não informado”. Para verificar se os sinistros citados como “não informado” ocorreram em curvas e fora do perímetro urbano, foi realizada uma verificação espacial de acordo com as coordenadas disponibilizadas. Os dados referentes a causa “bebida alcoólica” foram excluídos da amostra, pois entendeu-se que esses eventos podem não ter relação com os elementos geométricos da via. Para a espacialização e o tratamento dos dados, utilizou-se os softwares QGIS v.3.32.0 e Excel 2022. Os dados relativos aos sinistros entre 2017 e 2022 estão disponíveis com coordenadas de latitude e longitude. Destaca-se que entre 2013 e 2016, porém, as informações constam por km de rodovia. Nesses casos, as coordenadas foram obtidas utilizando o software online do DNIT, a plataforma VGEO (DNIT, 2023).

4.2.1. Caracterização dos Sinistros de Trânsito

No período entre 2013 e 2022 ocorreram 585 sinistros na BR-427/RN, entre as cidades de Caicó e Currais Novos, dos quais 96 foram em curvas. Este total representa 84% dos sinistros em retas e 16% em curvas. Na Figura 34 é mostrada a análise temporal dos sinistros na BR-427/RN.

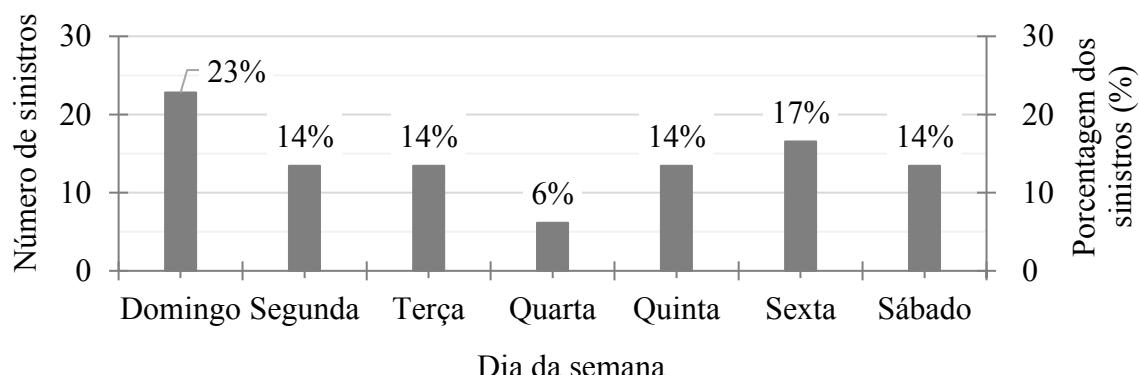
Figura 34 - Análise temporal dos sinistros de trânsito em curvas na BR-427.



Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Entre os anos analisados, 2014 foi o que apresentou o maior número de sinistros em curvas, com 21 eventos. Em contrapartida, o ano de 2020 foi o que apresentou menor incidência, com 5 sinistros. Os demais períodos se mantiveram na faixa entre 7 e 14. O fato de 2020 ter o número de sinistros reduzido pode estar relacionado com o período da Pandemia de COVID-19, contudo, não há informações dos dados de fluxo que comprovem a hipótese. Na Figura 35, são apresentados os dados de sinistros por dia da semana.

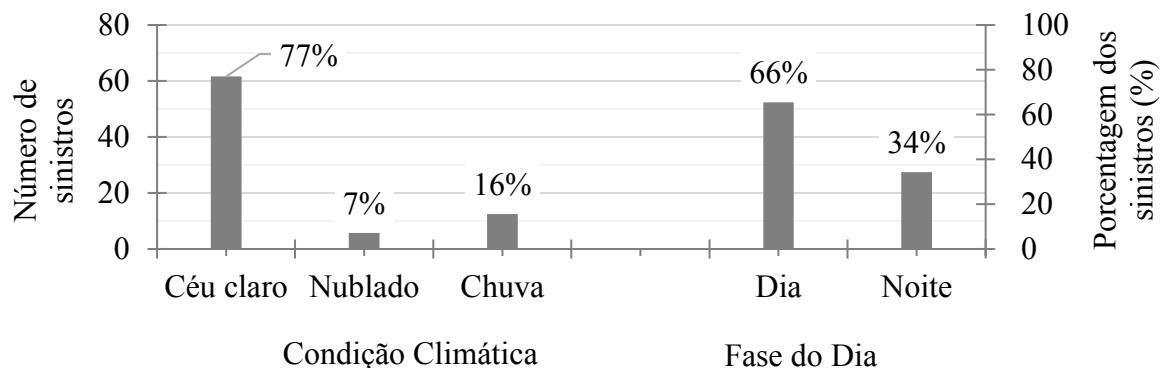
Figura 35 - Sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, por dia da semana, entre os anos de 2013 e 2022.



Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Os dados relativos aos sinistros ao longo da semana indicam que as ocorrências são mais frequentes nos fins de semana, com 23% aos domingos. Na Figura 36 são apresentados os dados sobre sinistros divididos por período do dia (a) e condições climáticas (b).

Figura 36 - Sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, entre os anos de 2013 e 2022, por fase do dia e condições climáticas.

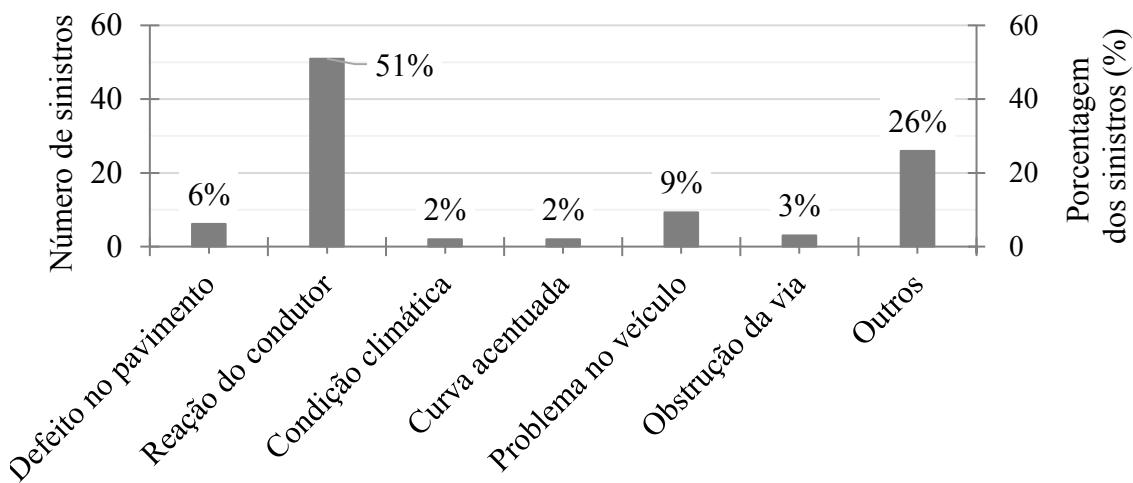


Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

No que se refere ao período do dia, a maioria dos sinistros em curvas ocorreu durante o período diurno (66%), associado a condição de céu claro (77%). Devido à complexidade da análise dos dados de fluxo veicular ao longo dos anos, não é possível afirmar com confiança a relação entre as fases do dia, as condições climáticas e os sinistros de trânsito. Embora exista, na literatura, indicações que sugerem que há uma redução do coeficiente de atrito e, por conseguinte, um aumento do risco de sinistros em condições de chuva (Cafiso *et al.*, 2020).

Apesar da região apresentar aproximadamente apenas três meses chuvosos por ano (EMPARN, 2022) e sugerir que a maioria dos sinistros pode ter ocorrido em dias de céu claro por esse fator, pesquisas como a de Buddhavarapu *et al.* (2013) indicaram que uma maior incidência de sinistros ocorre durante o dia e em superfícies secas, levando os autores a sugerirem que os motoristas tendem a adotar uma condução mais cautelosa e defensiva durante a noite e em condições de chuva. O estudo analisou cerca de 22.000 sinistros no Texas (EUA) e revelou que apenas 24% do total dos sinistros ocorreram em pistas molhadas e 32% durante a noite. Na Figura 37 são mostradas as causas dos sinistros apontadas pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) para o trecho em questão.

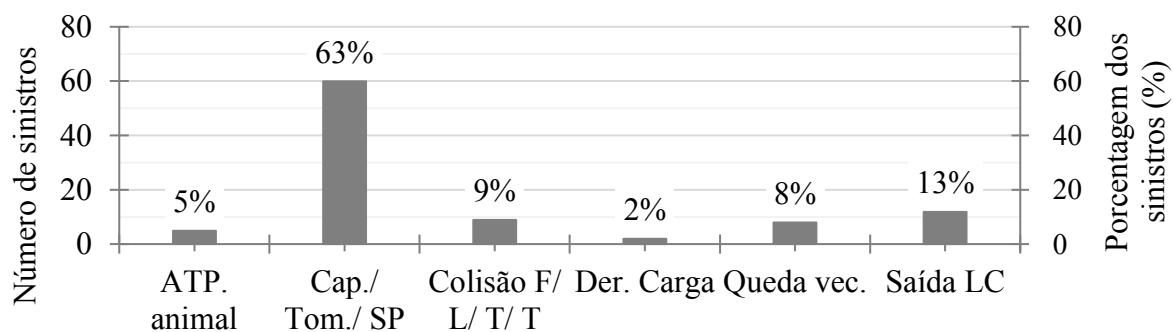
Figura 37 - Causas dos sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, entre os anos de 2013 e 2022.



Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

As causas dos sinistros indicados na Figura 37 são atribuídas pelos agentes de fiscalização. A reação do condutor é apontada como a principal causa (51% do total), seguido de “outros”, cuja designação não é explicada pelo banco de dados, mas contempla 26% dos sinistros. Em 2% dos casos, os agentes mencionam “curva acentuada”, mesmo sem ter dados geométricos da rodovia ou explicação científica apontada no relatório. Esses dados assemelham-se às conclusões de Lima *et al.* (2008). Esses autores citados argumentam que as causas dos sinistros registradas nos relatórios estão vinculadas apenas aos condutores, sem levar em conta os parâmetros de projeto. Isso levanta dúvidas sobre as verdadeiras causas dos sinistros. Na Figura 38 são mostrados os tipos de sinistros no trecho da BR-427.

Figura 38 - Tipos dos sinistros de trânsito em trecho da BR-427/RN, entre os anos de 2013 e 2022.



Legenda:

- ATP. animal - Atropelamento de animal/ objeto estático;
- Cap./ Tom./ SP - Capotamento/ tombamento/ saída de pista;
- Colisão F/ L/ T/ T - Colisão frontal / lateral/ transversal/ traseira;
- Der. Carga - Derramamento de carga;
- Queda vec. - Queda de veículo;
- Saída LC - Saída de leito carroçável.

Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Com base na Figura 38, é observado que os sinistros resultantes de capotamento, tombamento ou saída de pista representam a maior porcentagem, 63% (60 sinistros). Nesse tipo de ocorrência, o condutor possivelmente perde o controle da direção ao realizar uma manobra brusca, ocasionada por curva acentuada ou inconsistência no traçado geométrico. Nesse sentido, esse dado pode estar associado aos raios das curvas horizontais ou pequenas tangentes entre curvas.

Os sinistros do tipo “saída de leito carroçável” aparecem com 13% (12 sinistros), o que indica, inicialmente, colisão entre dois ou mais veículos. Contudo, de acordo com os relatórios policiais, destaca-se que todos os sinistros desse tipo envolveram apenas um veículo. Possivelmente, os sinistros nomeados como “saída de leito carroçável” sejam similares aos sinistros do tipo “saída de pista” e podem estar relacionados, também, com a geometria da via, já que estes eventos estão localizados em curvas. Por esse motivo, os sinistros do tipo “saída de leito carroçável” também foram avaliados.

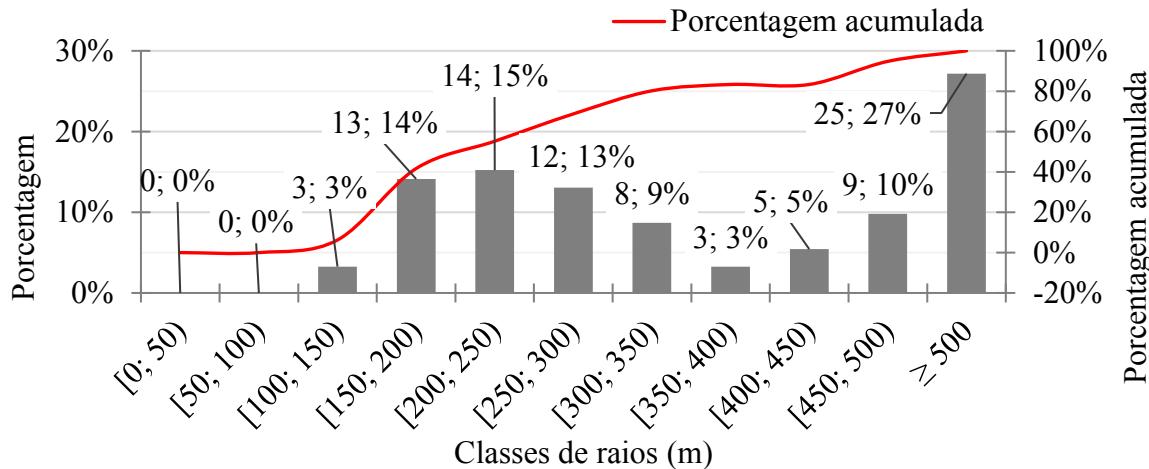
Dos 96 sinistros, 88 (91,6%) envolveram apenas um veículo e 8 (8,4%), dois veículos. Dos sinistros que envolveram dois veículos, as causas mencionadas foram: colisão traseira (3), colisão frontal (2) e colisão lateral e transversal (3). A análise dos dados indica que as colisões frontais, laterais e transversais podem estar relacionadas à geometria da via. A impossibilidade de realizar a trajetória da curva na faixa de rolamento correta, ocasionada por velocidade incompatível, curvas acentuadas ou inconsistência no traçado geométrico pode resultar na passagem do condutor para a faixa contrária e ocasionar o evento. Em relação aos sinistros envolvendo colisão traseira, as causas são mencionadas como: ausência de reação do condutor (1) e outras (2). Estes, por sua vez, podem não estar necessariamente relacionados à geometria, contudo, os dados não foram excluídos da amostra por se tratar de curvas e as causas não estarem bem explicadas.

4.2.2. Definição das Curvas Horizontais e Tangentes de Aproximação

O trecho da BR-427 é classificado com faixa simples de mão dupla e largura de 3,0 m por faixa. O limite de velocidade é de 80 km/h, exceto em alguns pontos em que a velocidade limite é de 60 km/h. O trajeto compreende 92 curvas horizontais e 92 tangentes. Com relação à geometria da via, o DNIT não tem banco de dados dessa rodovia específica, por esse motivo, foi realizada uma análise espacial para quantificar as curvas e tangentes. Na Figura 39 é

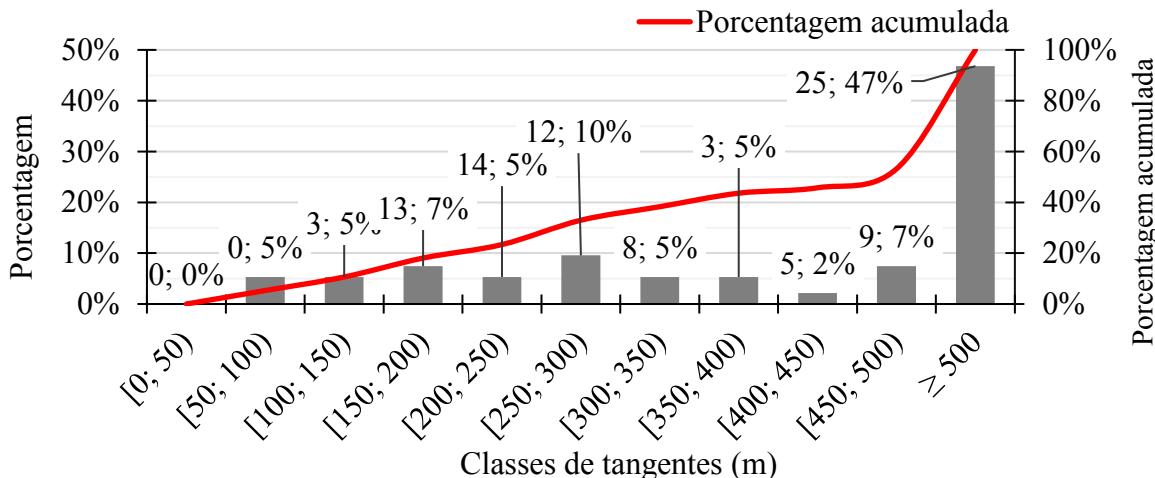
mostrado um gráfico com as classes de raios horizontais do trecho, já na Figura 40, um gráfico com as classes de tangentes de aproximação.

Figura 39 - Classes de raios horizontais do trecho da BR-427.



Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Figura 40 - Classe de tangentes do trecho da BR-427.

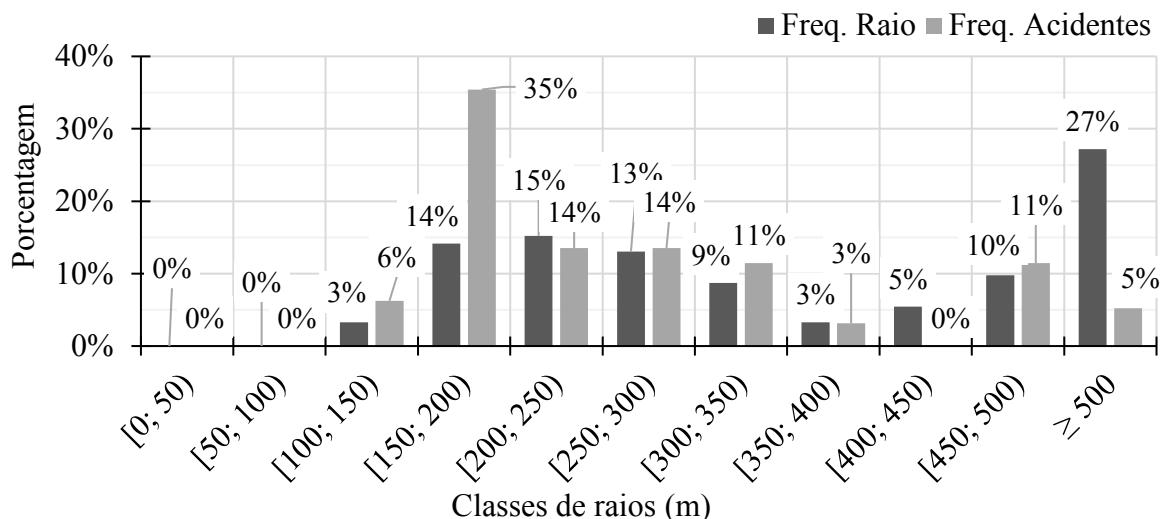


Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Analizando o gráfico da Figura 39, observa-se que as curvas horizontais de raios superiores a 500 m compreendem 27% do total, sendo seguidas por curvas horizontais de raios entre 200 e 250 m (15%), e, sequencialmente, curvas de raios horizontais entre 150 e 200 m (14%). Na Figura 40 são observadas as classificações das tangentes de aproximação das curvas. Nelas, os trechos retos superiores a 500 m compreendem a maior parte, com cerca de 47%; seguido de tangentes entre 250 e 300 m, com 10%. Na sequência, as classificações entre 150 e 200 m e 450 e 500 m aparecem com 7% cada. Cerca de 23% dos trechos em tangente são inferiores a 250 m, isso indica que, possivelmente, há incidência de proximidade entre as curvas.

horizontais no trecho avaliado. Curvas seguidas de tangentes inferiores a 250 m podem indicar possíveis causas de sinistros de trânsito (Bobermin e Ferreira, 2021). Na Figura 41 são mostradas as frequências das curvas horizontais e sinistros de trânsito no trecho da BR-427.

Figura 41 - Frequência de raios de curvas horizontais e sinistros no trecho da BR-427.

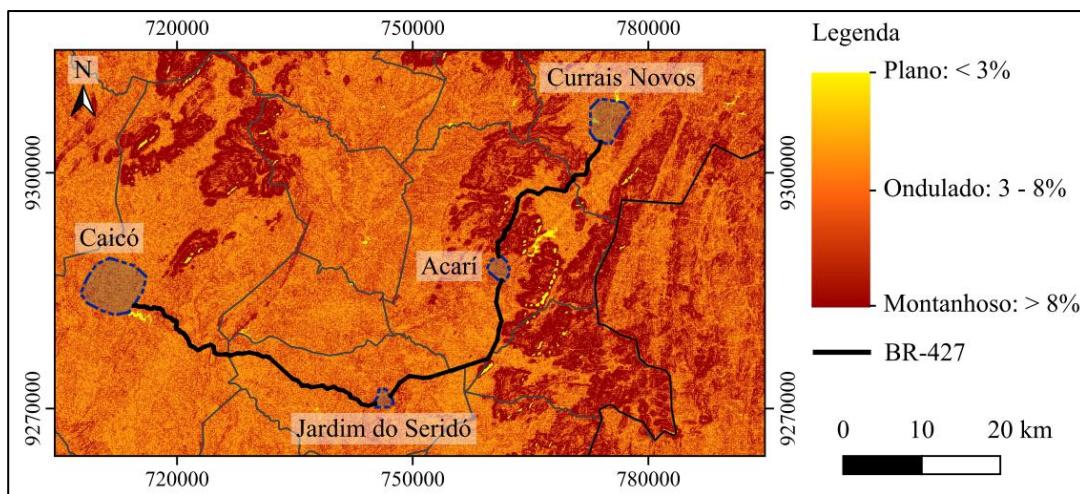


Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

Com base na Figura 41, observa-se que a maior parte dos sinistros de trânsito (55%) ocorreu em curvas de raios inferiores a 250 m, que representam 33% do total de curvas horizontais. Por meio da caracterização dos sinistros, foi observado que os raios de curvas horizontais entre 150 e 200 m compreendem a maior parte dos sinistros de trânsito, cerca de 35%.

Para este estudo, as curvas horizontais e as tangentes de aproximação foram nomeadas de forma crescente, da C1 a C92 (curvas) e T1 a T92 (tangentes), no sentido do trajeto da cidade de Caicó para Currais Novos. As curvas C1 a C53 estão no trecho entre Caicó e Jardim do Seridó; as curvas C54 a C63 estão entre Jardim do Seridó e Acarí e as curvas C64 a C89 estão entre Acarí e Currais Novos. Na Figura 42 é mostrado um mapa de declividade da área de estudo. De acordo com o DNIT (1999), as regiões podem ser classificadas como terreno plano (declividade entre 0 e 3%), ondulado (entre 3 e 8%) e montanhoso (superiores a 8%).

Figura 42 - Mapa de declividade da área de estudo



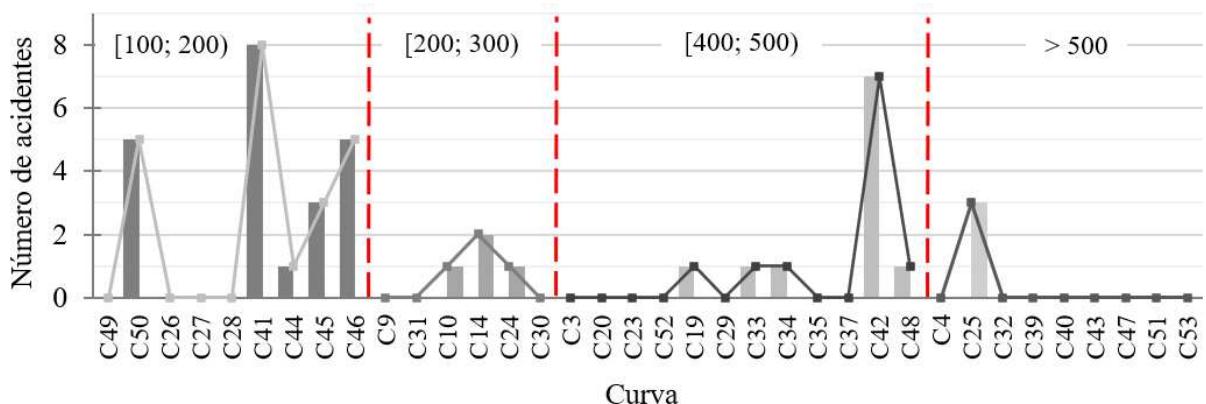
Fonte: Adaptado do USGS (2024).

De acordo com a Figura 42, a maior parte do trajeto está classificado entre terreno plano a ondulado. Todavia, entre as cidades de Acarí e Currais Novos e uma parte do trajeto que compreende as cidades de Jardim do Seridó e Acarí, classifica-se como terreno predominantemente montanhoso, com inclinações superiores a 8%. Com relação aos sinistros, a análise da Figura 30 mostra que a maior parte ocorreu entre as cidades de Caicó-Jardim do Seridó e Acarí-Currais Novos. Diante disso, com o objetivo de avaliar curvas com características em terrenos semelhantes, as curvas referentes aos trajetos entre Jardim do Seridó e Currais novos (C54 a C92) foram excluídas da amostra.

Além da similaridade em terrenos, o estudo também visou avaliar o comportamento do condutor em curvas isoladas, ou seja, trechos que não tenham influência de outras curvas anteriores em função de tangentes de aproximação curtas. Nesse contexto, a literatura menciona que tangentes curtas, que caracterizam curvas reservas, variam entre 150 e 250 m (AASHTO, 2018). Por este motivo, essa pesquisa filtrou as curvas que contêm tangentes de aproximação superiores a 250 m em ambos os sentidos. No total, 36 curvas foram selecionadas após os critérios iniciais.

As curvas foram divididas em quatro classes de raios, entre 100 e 200 m, 200 e 300 m, 400 e 500 m e superiores a 500 m. Nenhuma das classes de raios entre 300 e 400 m atendeu aos critérios determinados (tangentes superiores a 250 m e em terreno de plano a ondulado). Na Figura 43 é mostrado um gráfico das 36 curvas da BR-427 e os seus respectivos sinistros. As nomenclaturas estão ordenadas de acordo com o tamanho do raio dentro da mesma classe.

Figura 43 - Sinistros na BR-427, entre 2013 e 2022, no trecho entre Caicó e Jardim do Seridó, por classes de raio.



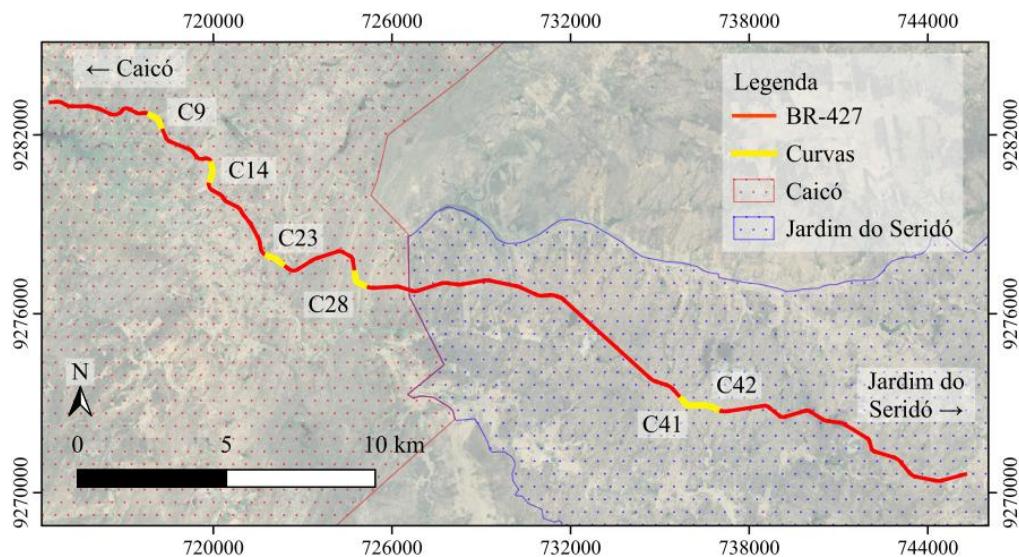
Fonte: Adaptado de Brasil (2023).

De acordo com a análise da Figura 43, é observado que a maior frequência de ocorrência de sinistros é nas curvas com raios horizontais entre 100 e 200 m, com a maior ocorrência na C41, com 8 sinistros. Para raios entre 200 e 300 m, a C14 se destaca, com 2 sinistros, enquanto as demais têm 0 ou 1 sinistro. Para as curvas entre 400 e 500 m, a C42 se distancia das demais, com 6 sinistros. É importante mencionar que as curvas C41 e C42 são seguidas, porém, com tangentes superiores a 250 m (de acordo com o critério adotado). Já para as curvas superiores a 500 m, apenas a C25 apresentou sinistros, 3 no total.

Na Figura 43, é mostrado que os sinistros não seguem um padrão homogêneo, pois na classe entre 100 e 200 m, por exemplo, há curvas com maior incidência de sinistros (C49, C41 e C46); e outras com nenhuma ocorrência (C26, C27 e C28). O mesmo ocorre nas demais classes de raios. Os sinistros podem ter relação com a geometria da via, contudo, para compreender melhor o fenômeno, é importante avaliar, também, as diferenças entre curvas da mesma classe de raios.

Com o objetivo de avaliar o padrão de condução veicular, a definição das curvas teve como premissa, além das já citadas, verificar curvas com geometrias semelhantes que haviam ocorrências de sinistros e outras que não apresentavam. Diante disso, as escolhidas foram: C28 e C41 (100 e 200 m), C9 e C14 (200 e 300 m) e C23 e C42 (400 e 500 m). Na Figura 44 é mostrado um mapa com a localização das curvas selecionadas.

Figura 44 - Curvas horizontais C9, C14, C23, C28, C41 e C42 da BR-427, entre Caicó e Jardim do Seridó.

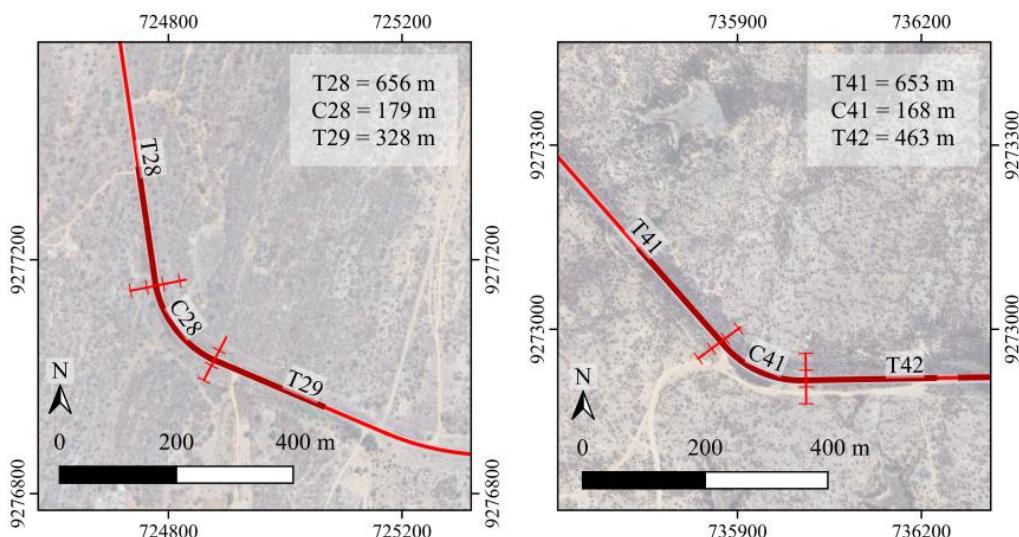


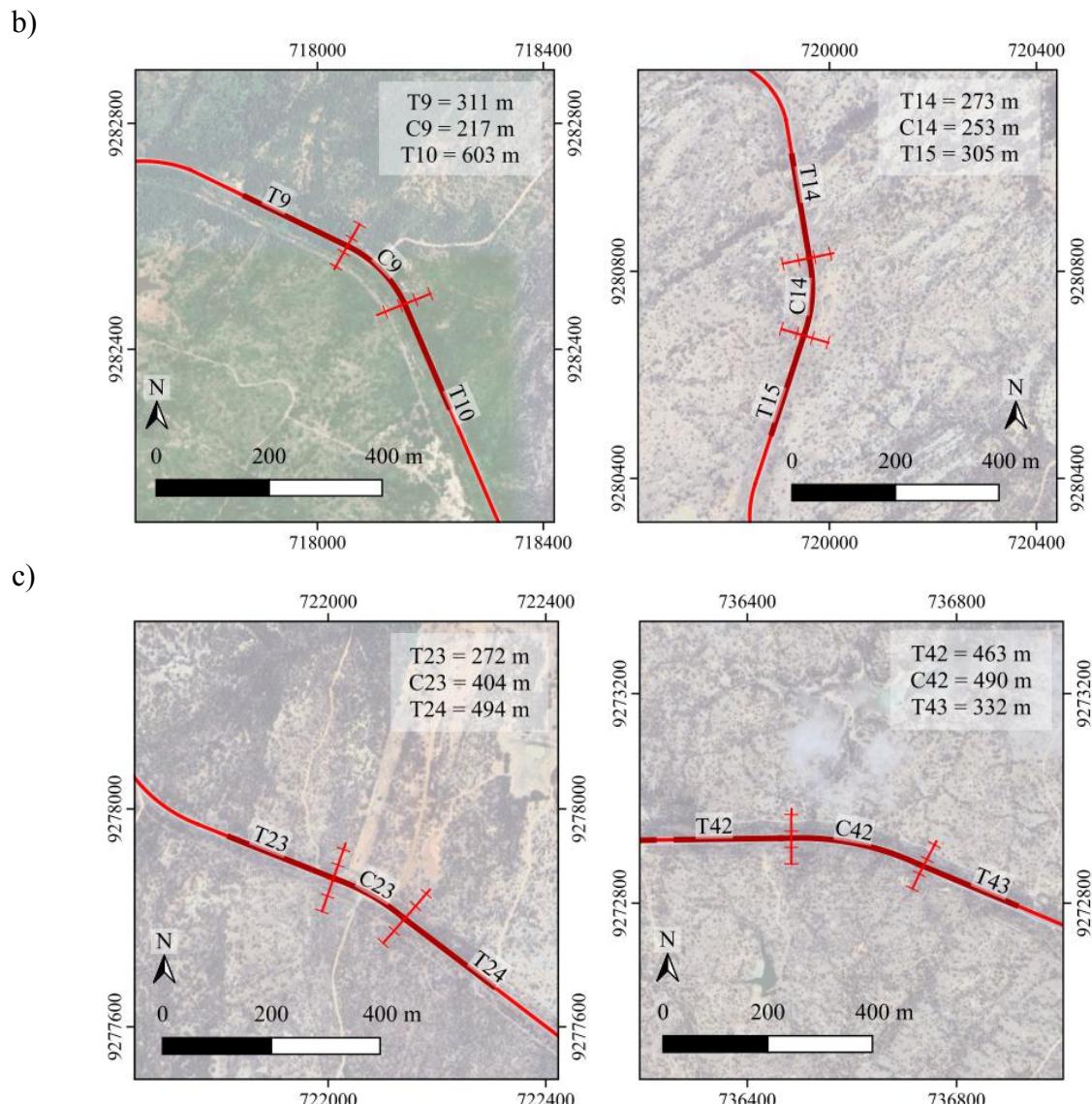
Fonte: Autor.

Na Figura 45 são mostradas as curvas selecionadas separadas de acordo com a classe do raio. Na Figura 45a estão as curvas C28 e C41, que pertencem à classe de raio entre 100 e 200 m. Na Figura 45b, C28 e C41, com raios entre 200 e 300 m. Na Figura 45c, C23 e C42, que possuem classe entre 400 e 500 m. Os termos intitulados de “T” na legenda representam as tangentes e suas extensões. Enquanto o termo “C” representa as curvas e os valores dos raios.

Figura 45 - Curvas da BR-427 da classe a) 100 a 200 m (C28 e C41), b) 200 a 300 m (C9 e C14) e c) 400 a 500 m (C23 e C42).

a)





Fonte: Autor.

4.3. Análise das Curvas Horizontais e Tangentes de Aproximação

No item 4.2, as informações referentes aos sinistros de trânsito foram exploradas a fim de caracterizar os incidentes que estejam relacionados com as curvas e com as tangentes de aproximação. Posteriormente, foi realizada a elaboração dos mapas de intensidade e a avaliação preliminar do traçado geométrico selecionado, por meio do *Software QGis*. Os dados históricos dos sinistros foram distribuídos em grupos, a fim de avaliar quais elementos têm maior frequência de sinistros ao longo dos anos verificados.

4.3.1. Levantamento Planialtimétrico dos Trechos do Estudo

Para avaliar a geometria da via, foi realizado o levantamento planialtimétrico georreferenciado em todas as curvas definidas no item 4.2.2. A finalidade foi obter informações geométricas da via, tais como o raio da curva horizontal, comprimento da curva, comprimento das tangentes e inclinações longitudinais nos dois sentidos (aclive e declive). O equipamento utilizado foi um *GNSS TOPCON GRS-1*, embarcado ao veículo (Figura 46).

Figura 46 - *GNSS TOPCON GRS-1* acoplado ao veículo.



Fonte: Autor.

O levantamento georreferenciado foi realizado na função GRS+, *Real Time Kinematic (RTK)*, de modo cinemático, com uma coleta a cada 0,20 segundos (5 Hz). Devido ao fluxo de veículos na via, a velocidade do trajeto variou entre 40 e 50 km/h. Desse modo, um ponto georreferenciado foi coletado entre 2 e 3 m ao longo do trajeto. Os dados obtidos no levantamento foram processados no *Software TOPCON Tools*. Posteriormente, foram utilizados os softwares *QGis* e *AutoCAD Civil 3D* para modelagem tridimensional da superfície e obtenção dos parâmetros geométricos. Na Tabela 8 é mostrado um resumo das descrições das curvas selecionadas.

Tabela 8 - Descrição das curvas da C28, C41, C9, C14, C23 e C42 da BR-427.

Curva	Tangente 01 (m)	Raio (m)	Desenvolvimento (m)	Tangente 02 (m)
C28	328	179	164	656
C41	463	168	167	653
C9	311	217	147	603
C14	273	253	152	305
C23	272	404	150	494
C42	463	490	259	332

Fonte: Autor.

4.3.2. Avaliação da Trajetória, Acelerações e Velocidade dos Veículos

Como abordado ao longo deste documento, a variação de velocidades e as ações bruscas dos motoristas podem indicar inconsistências no desenho geométrico da via. Além disso, a condição da superfície pode ser alterada também a dessas ações. Aceleração e desaceleração de um veículo na curva podem impactar no atrito da superfície. Portanto, é fundamental avaliar as condições geométricas e da superfície do pavimento e correlacionar esses parâmetros com a condução veicular a fim de mapear zonas que podem ser mais perigosas para o condutor.

Definidas as curvas e as tangentes de aproximação do estudo, foram avaliadas as trajetórias e velocidades dos veículos nos trechos determinados. Para alcançar o objetivo proposto, foi desenvolvido um sistema embarcado formado por módulos (sensores) acoplados a uma placa Arduíno ESP32.

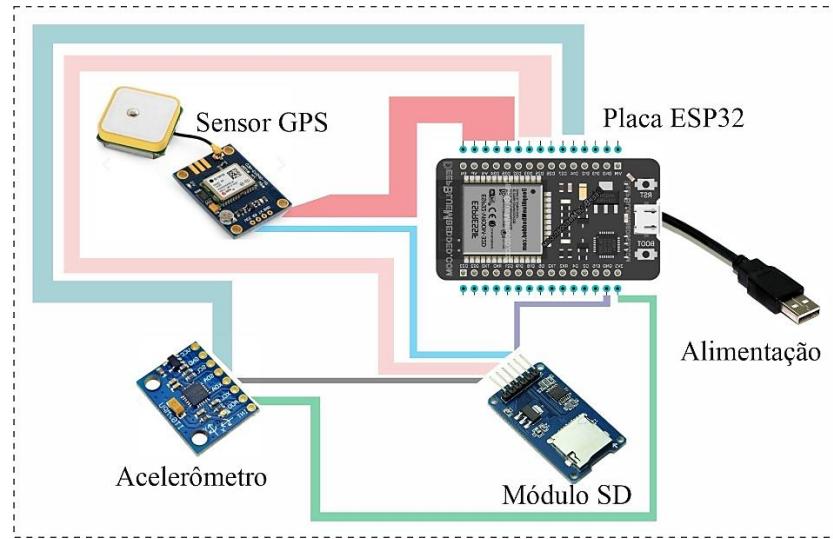
O dispositivo fornece informações de geolocalização, por meio do sensor *Global Positioning System - GPS*, acelerações no eixo X, Y e Z (por meio de sensor acelerômetro de 9 eixos, em gravidade), velocidades (em km/h), dia e horário. A frequência das observações do acelerômetro foi de 10 Hz (10 coletas por segundo). Contudo, a capacidade máxima do módulo de GPS é de 1 Hz, por isso, foi feita uma interpolação das coordenadas no *software Python* para obter a localização exata das coletas em 10 Hz. Na Figura 47 é mostrado o sistema embarcado acoplado no veículo. Na Figura 48 é mostrado um esboço da estrutura do dispositivo.

Figura 47 - Dispositivo embarcado acoplado ao veículo.



Fonte: Autor.

Figura 48 - Esboço da estrutura do dispositivo embarcado.

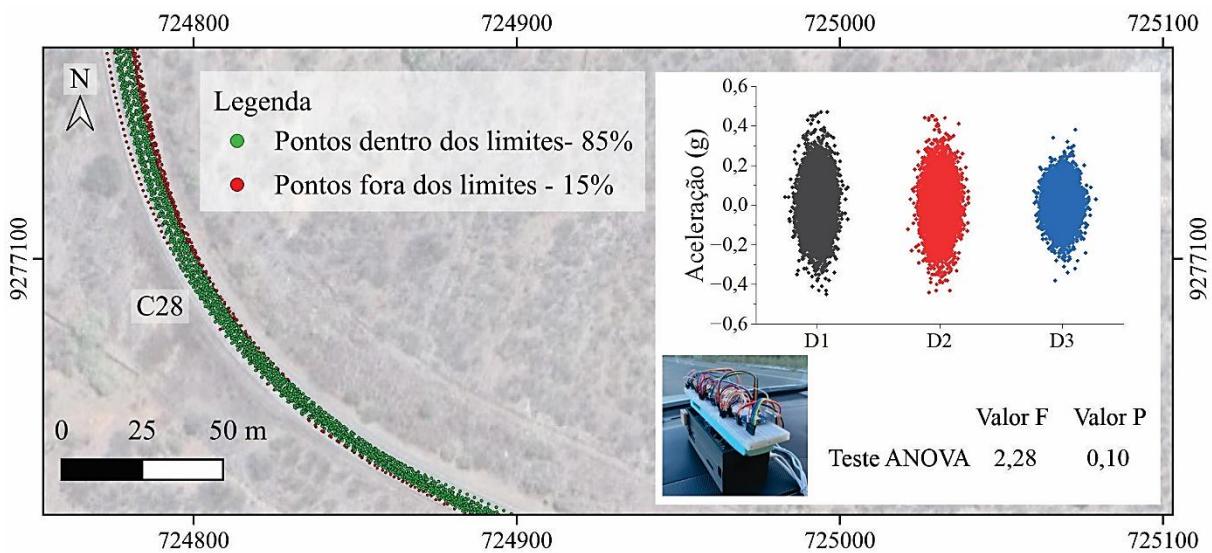


Fonte: Autor.

Os sistemas embarcados foram acoplados no console central interno (Figura 47), como já realizada por outros autores que coletaram as acelerações transversais de veículos, tais como Xu *et al.* (2024). Foram avaliados 5 condutores na faixa etária entre 31 e 45 anos e mais de 5 anos de habilitação. Foram utilizados 4 veículos diferentes tipo carro de passeio com características e pesos semelhantes. Cada condutor realizou 3 percursos, ao todo, foram realizadas 30 coletas em cada curva, 15 para cada sentido (direito e esquerdo). Todas as coletas foram realizadas sob céu claro, em plena luz do dia e com trânsito livre, isto é, sem interferências de outros veículos.

Para a validação da geolocalização do sensor GPS, foi realizada uma avaliação da quantidade de pontos em ambos os sentidos que estavam no limite da superfície das curvas obtida no levantamento com o *GNSS*. Ao todo, 38.000 pontos foram avaliados nas 30 coletas para as seis curvas. Na Figura 49 é mostrado um gráfico com o exemplo dos pontos na curva C28. Observou-se que 85% de todos os pontos coletados estavam dentro dos limites de todas as curvas. O resultado foi satisfatório, considerando que apenas 15% das avaliações estavam fora do limite da curva.

Figura 49 - Validação dos sensores GPS e acelerômetro do dispositivo embarcado.



Fonte: Autor.

Com relação aos acelerômetros, foi realizada uma coleta com três dispositivos funcionando simultaneamente. No total, o trajeto compreendeu 20 km e 12.000 coletas para cada dispositivo. A frequência foi a mesma utilizada no estudo, 10 Hz. À direita da Figura 49 é mostrado um gráfico de frequências das acelerações transversais para os três Dispositivos (D1, D2 e D3). As variações das acelerações foram entre 0.5 e -0.5 \times gravidade (g, em m/s^2). Os dispositivos têm variações similares, com médias próximas de zero. Devido ao trajeto ser realizado de forma simultânea entre retas e curvas, é comum que as acelerações transversais se aproximem de zero.

Para validar os resultados, foi realizado um teste ANOVA com o nível de significância de 0,05 para a igualdade entre as amostras. O valor P de 0,10 para o teste estatístico resulta que a hipótese nula não é descartada, isto é, as amostras são consideradas estatisticamente iguais ao nível de significância de 0,05. O valor F de 2.28 está associado à razão da variação entre os grupos e dentro dos grupos e é considerado moderado. No item 4.3.3, são mostrados mais detalhes relacionados às coletas e às nomenclaturas do estudo.

4.3.3. Definição das Coletas, Nomenclaturas do Estudo e Zonas de Análise

No item 4.2.2, foram definidas as curvas e tangentes de aproximação. No total, o estudo foi realizado em 6 curvas da BR-427 (C28, C41, C9, C14, C23 e C42, em sequência, de acordo com a classe de raio). Já no item 4.3.1, foi mostrado como o levantamento

planialtimétrico e as coletas foram realizadas. Este subtópico é dedicado a definir as nomenclaturas e considerações utilizadas no estudo e as zonas de análise nas curvas.

Os trajetos foram definidos com a nomenclatura de T1 a T15, que representam do Trajeto 1 ao Trajeto 15 para os cinco condutores, em cada sentido da via. Para a compreensão e a análise, as curvas foram renomeadas de acordo com a classe de raio – C1 e C2 para as curvas entre 100-200 m, C3 e C4 entre 200-300 m e C5 e C6 para 400-500 m. Na Tabela 9 é mostrado um resumo das descrições das curvas selecionadas. Importa destacar que a coluna 2 trata da nova nomenclatura que será abordada neste estudo.

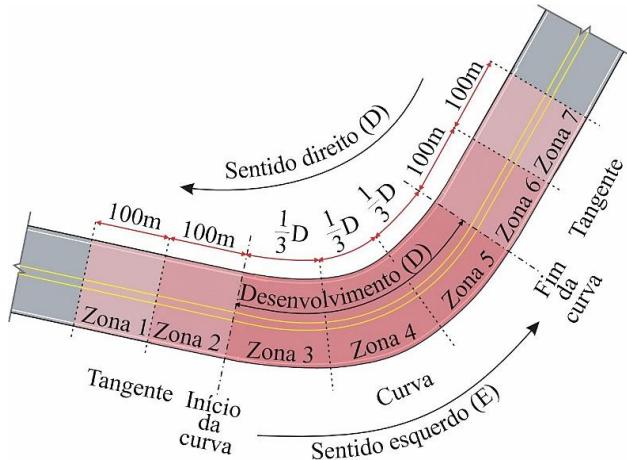
Tabela 9 – Descrição das curvas da BR-427 selecionadas para o estudo.

ID original	Descrição atual
C28	C1
C41	C2
C9	C3
C14	C4
C23	C5
C42	C6

Fonte: Autor.

Devido a quantidade de dados, a análise ponto a ponto poderia não representar tendências de comportamento e difícil compreensão das variações entre eles, por esse motivo, as curvas foram divididas por zonas, semelhante ao estudo realizado por Dhahir e Hassan (2018). Nesse contexto, este estudo propôs a divisão da curva em sete zonas (na Figura 50). As zonas 1 e 2 compreendem as tangentes de entrada, com 100 m de extensão cada. As zonas 3, 4 e 5 estão no interior da curva, cada uma tem extensão igual a 1/3 do desenvolvimento da curva. As zonas 6 e 7 estão inseridas na tangente de saída, com 100 m de extensão cada.

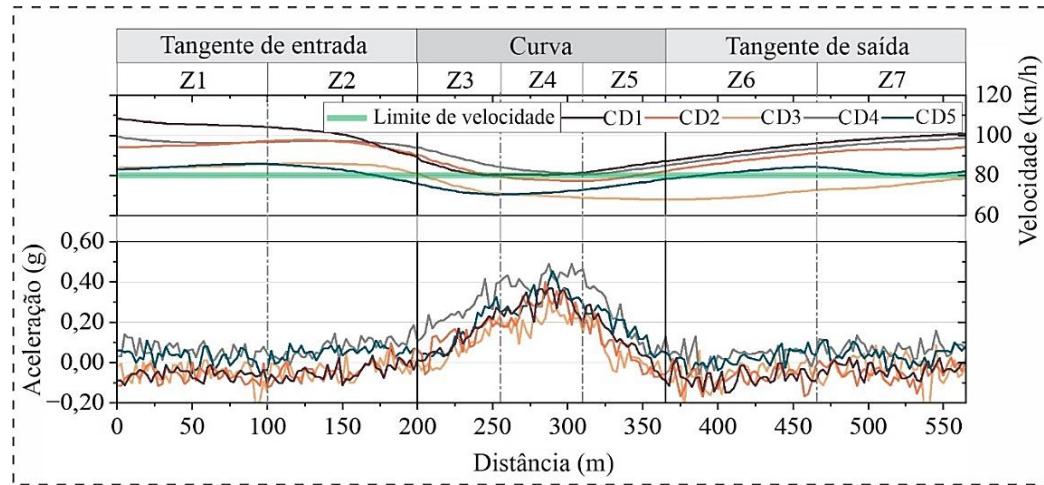
Figura 50 – Esboço de um modelo de curva dividida em sete zonas.



Fonte: Autor.

Com o dispositivo desenvolvido, é possível obter as velocidades e acelerações transversais ao longo do trecho, como mostrado na Figura 51. No exemplo, as velocidades (no eixo direito e linhas superiores) e acelerações transversais (no eixo esquerdo e linhas inferiores) são mostradas para os cinco condutores no sentido D da curva C2.

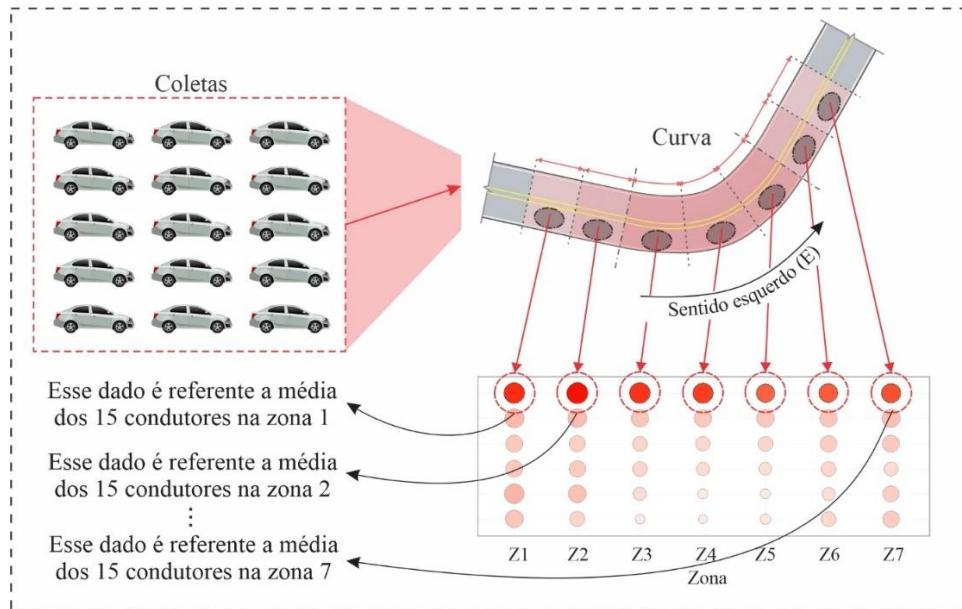
Figura 51 – Velocidade e aceleração transversal na curva C2, sentido D.



Fonte: Autor.

Devido ao grande número de coletas (cerca de 38.000), foi necessário realizar um tratamento no banco de dados a fim de agrupar as observações. Por esse motivo, os métodos selecionados para avaliar todas as coletas de forma conjunta foram o gráfico de linhas e a matriz de dados. Na Figura 52 é mostrado o fluxograma explicando como os dados são agrupados até a apresentação no gráfico tipo matriz.

Figura 52 – Método para tratamento dos dados e divisão das zonas.

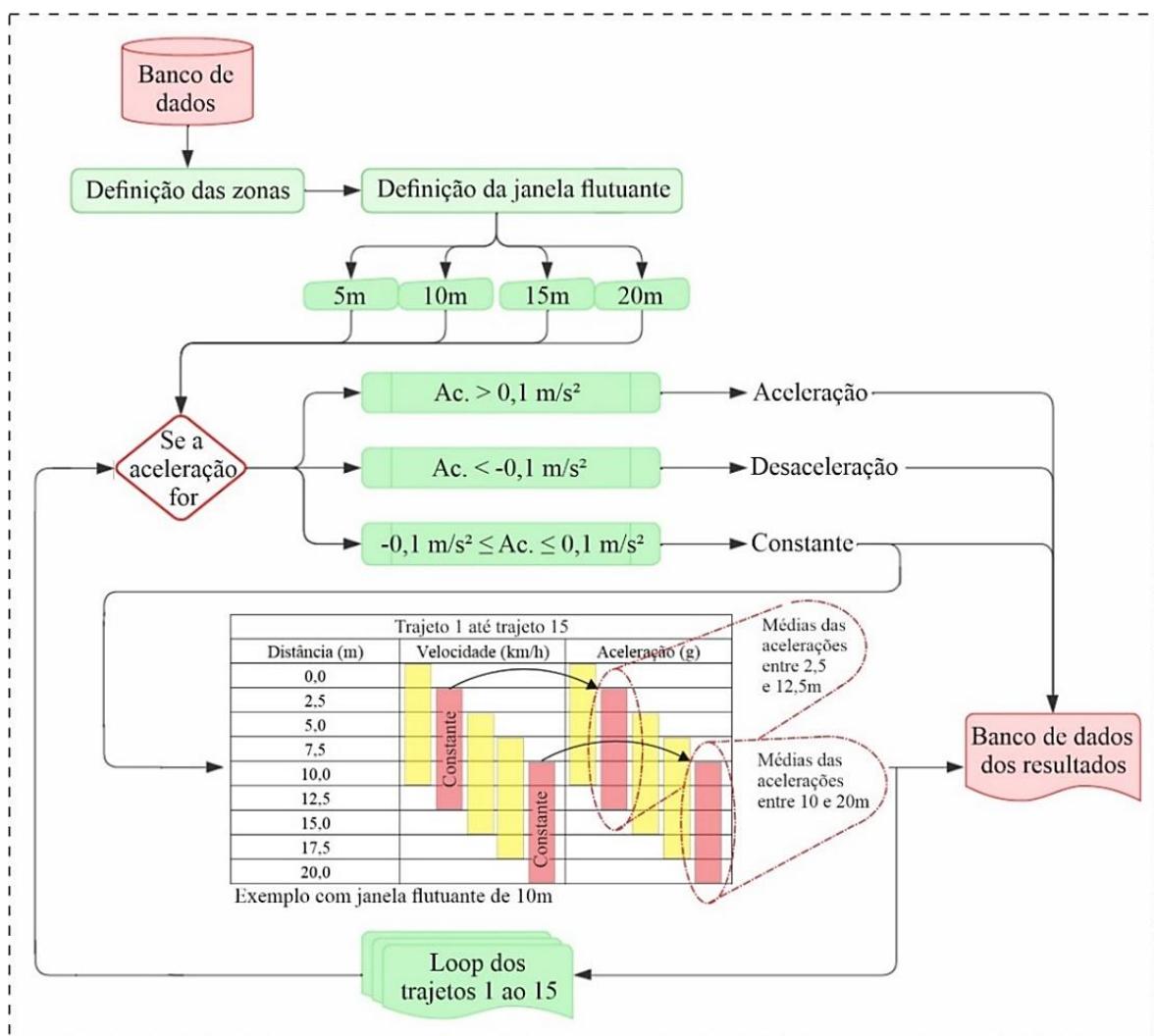


Fonte: Autor.

4.3.4. Avaliação do Conforto do Motorista

Com base nos estudos desenvolvidos no item 4.3.3 espera-se compreender como a aceleração transversal está associada ao padrão de condução em curvas. Posteriormente, foi desenvolvida uma adaptação do modelo proposto por Dhahir e Hassan (2018). Nesta pesquisa, os critérios de avaliação da velocidade constante, aceleração e desaceleração foram definidos apenas com base no limite de aceleração longitudinal. Além disso, o método sugerido se diferencia por avaliar limites de conforto de acordo com a classe do raio (entre 100-200 m, 200-300 m e 400-500 m) para pista simples de mão dupla. Na Figura 53 são mostradas as etapas metodológicas do método.

Figura 53 – Etapas metodológicas para avaliação do conforto do motorista.



Fonte: Autor.

Na Figura 53 é mostrado um fluxograma com as etapas metodológicas para a adaptação do método proposto por Dhahir e Hassan (2018). Inicialmente, o procedimento foi aplicado apenas as zonas que compreendem o interior da curva, isto é, zonas Z3, Z4 e Z5 (item 4.3.3). Posteriormente, foi definida a distância na qual as observações foram avaliadas, chamada de “janela flutuante”. No exemplo do fluxograma, é mostrada a avaliação do Trajeto 1 com a janela flutuante referente a 10 m, ou seja, as observações das distâncias 0 a 10 m formam uma janela para a análise. Após isso, a próxima janela será entre 2,5 e 12,5 m e assim sucessivamente até o fim da curva. Neste estudo, foram avaliados quatro tamanhos de janelas flutuantes: 5 m, 10 m, 15 m e 20 m.

Posteriormente, o critério de constância da velocidade é aplicado na janela flutuante definida (de 0 a 10 m, por exemplo). Se a aceleração longitudinal na janela for superior a $0,1 \text{ m/s}^2$, é considerada aceleração; se for inferior a $-0,1 \text{ m/s}^2$, é considerada uma zona de

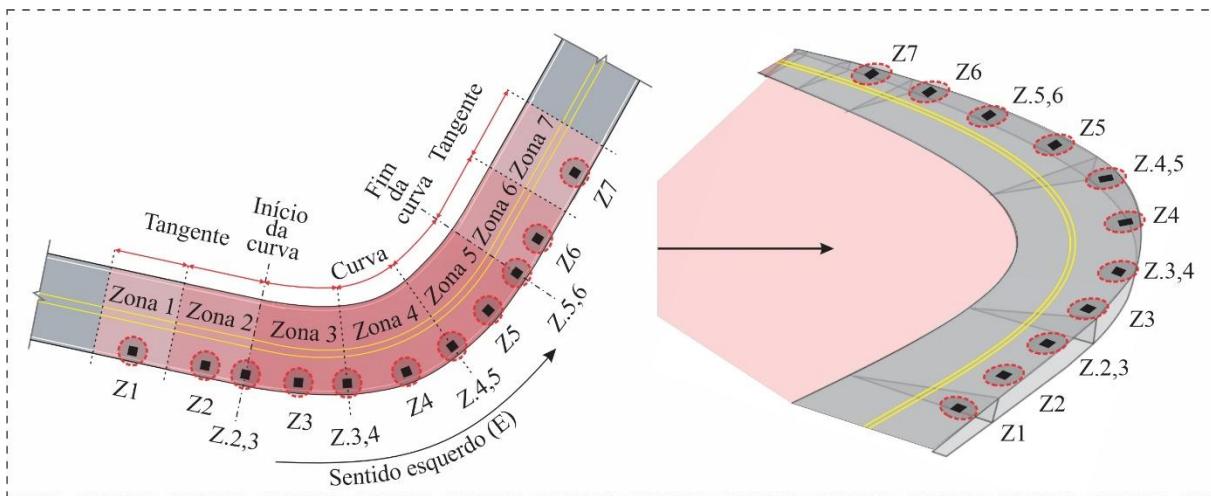
desaceleração. Se a aceleração longitudinal estiver entre -0,1 e 0,1 m/s², a velocidade é constante.

Quando a janela é considerada com velocidade constante, é feita uma média de todas as acelerações transversais da janela respectiva e armazenada no banco de dados. Ao final, o procedimento inicia novamente com a próxima janela flutuante (de 2,5 a 12,5 m, por exemplo). Esse processo é chamado *loop*, ele inicia na Z3 e vai até o final da Z5. Quando a avaliação do Trajeto 1 é realizada em todas as janelas flutuantes, o *loop* é aplicado ao Trajeto 2 até o Trajeto 15. Dessa forma, a aceleração transversal média para essa curva é igual a média das acelerações transversais de todas as janelas flutuantes para os 15 trajetos (Trajeto 1 ao Trajeto 15).

4.3.5. Análise dos Parâmetros Superficiais do Pavimento

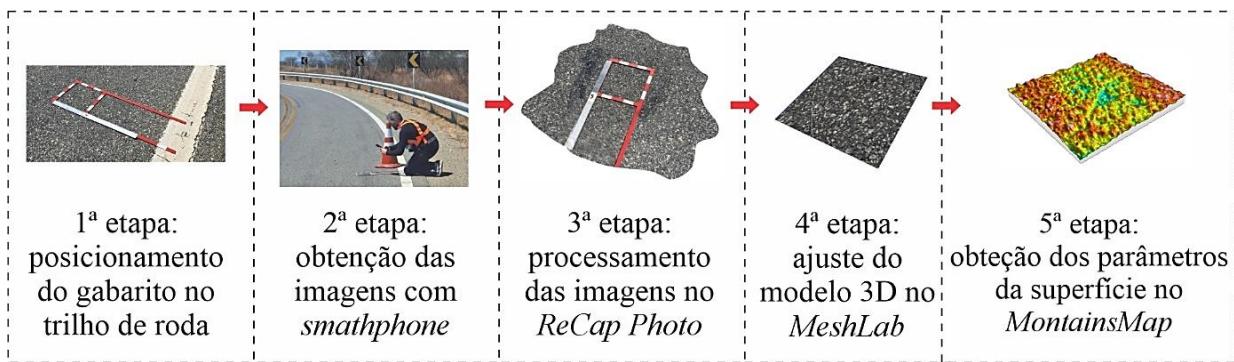
Definidos os trechos de estudo (item 4.3), espera-se que o método proposto no item 4.3.2 resulte na estimativa de pontos considerados críticos ao longo destes. Essa criticidade foi avaliada em associação às ações do motorista (desvio de trajetória e variação de velocidade) com os parâmetros geométricos da via (4.3.1). A partir disso, optou-se por avaliar um ponto em cada zona e nas divisões das curvas (11, no total), além de considerar a borda externa da curva à esquerda. Os pontos estão destacados nos retângulos na cor preta (Figura 54). Na Figura 55 são mostradas as etapas para a obtenção dos parâmetros superficiais.

Figura 54 - Pontos de análise dos coeficientes de atrito em curvas.



Fonte: Autor.

Figura 55 - Etapas para obtenção dos parâmetros superficiais do pavimento.



Fonte: Autor.

Após a seleção dos pontos críticos, foi aplicada a metodologia proposta por Kogbara *et al.* (2018) e Maia (2020) para a elaboração da malha que representa o atrito longitudinal e o atrito transversal. O método consiste na utilização dos conceitos de estereoscopia e fotogrametria e da técnica *Close-range photogrammetry (CRP)* para gerar imagens 3D da superfície do pavimento. Foi utilizado o Software *ReCap Photo (Autodesk)* para processamento dos dados. Posteriormente, as ferramentas *MeshLab* e *MountainsMap Premium* foram usadas para gerar os mapas topográficos 3D e obter os parâmetros de textura da superfície. No Quadro 10 são mostrados os parâmetros obtidos nesta pesquisa.

Quadro 6 - Parâmetros de textura da superfície obtidos na curva crítica.

Macrotextura		
Parâmetro	Unidade	Descrição
V_v	mm^3/mm^2	Volume dos vazios pela quantidade de área;
V_{mc}	mm^3/mm^2	Volume de material no núcleo com limite de 10%;
V_{vc}	mm^3/mm^2	Volume dos vazios no núcleo com limite de 10%;
V_{vv}	mm^3/mm^2	Volume dos vazios nos vales (referente ao limite de 80%).
Microtextura		
Parâmetro	Unidade	Descrição
S_a	mm	Altura média da superfície - média aritmética absoluta da superfície;
S_{pd}	$1/\text{mm}^2$	Densidade dos picos da superfície;
V_{mp}	mm^3/mm^2	Volume máximo do material limitado a 10% das alturas;

Fonte: adaptado da norma ISO 25178-2 (2012).

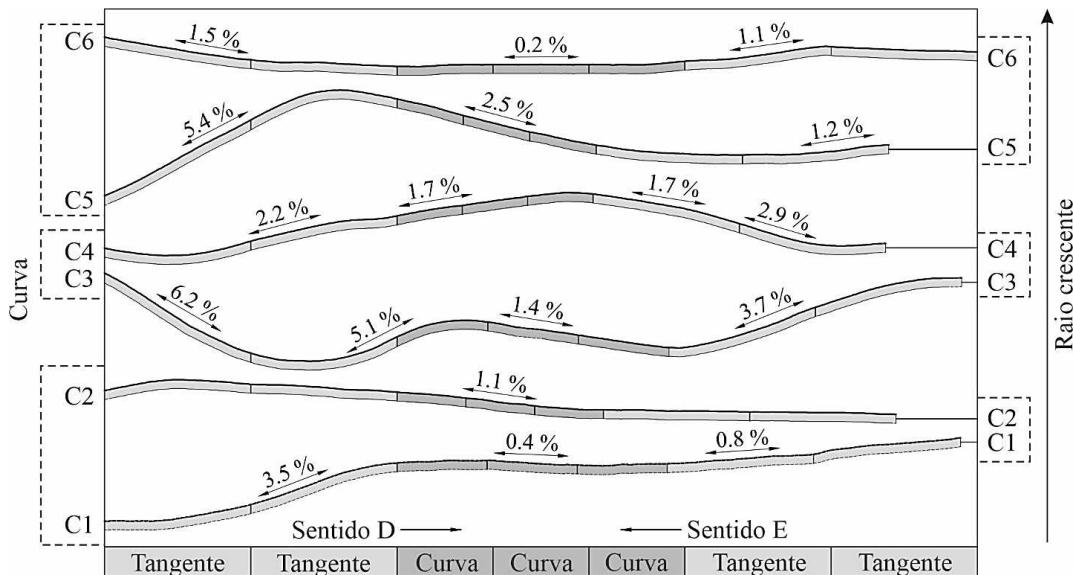
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados do estudo e está subdividido em 5 subtópicos: Análise da Geometria da Via e velocidade do condutor, Intensidade da Variação da Velocidade, Inclinações Longitudinais e Raio de Curva, Efeito da Geometria da Via e Velocidade do Condutor na Aceleração Transversal, Análise do Conforto do Motorista em Curvas Horizontais e Impacto do Padrão de Condução na Superfície do Pavimento.

5.1. Análise da Geometria da Via e Velocidade do Condutor

Os parâmetros geométricos da via relacionados à inclinação longitudinal, ao comprimento das tangentes, ao desenvolvimento e raio das curvas foram avaliados. Na Figura 56 são mostrados os perfis longitudinais das curvas em análise. O eixo horizontal representa as distâncias divididas entre tangentes e curvas. As inclinações longitudinais estão mostradas acima de cada alinhamento, em porcentagem.

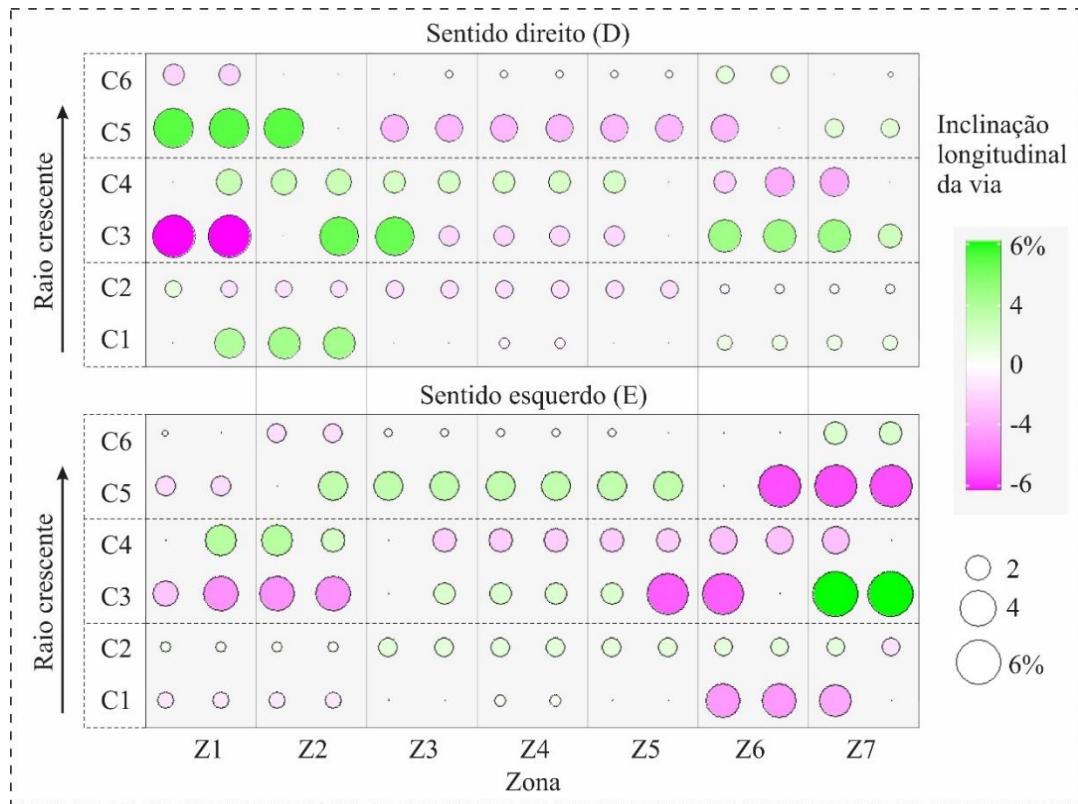
Figura 56 - Perfis longitudinais das curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 da BR-427.



Fonte: Autor.

Como modelo representativo, as inclinações longitudinais da Figura 56 são mostradas em formato de matriz na Figura 57. Cada zona é representada por duas inclinações longitudinais de acordo com o perfil da via. Inclinações negativas indicam declive, isto é, rampa descendente. Por sua vez, inclinações positivas remetem aclives, ou seja, rampas ascendentes. Mudança de rampa descendente pra ascendente indica curva vertical côncava. Enquanto mudança de rampa ascendente pra descendente, curva vertical convexa.

Figura 57 - Matriz de inclinações longitudinais das curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6.



Fonte: Autor.

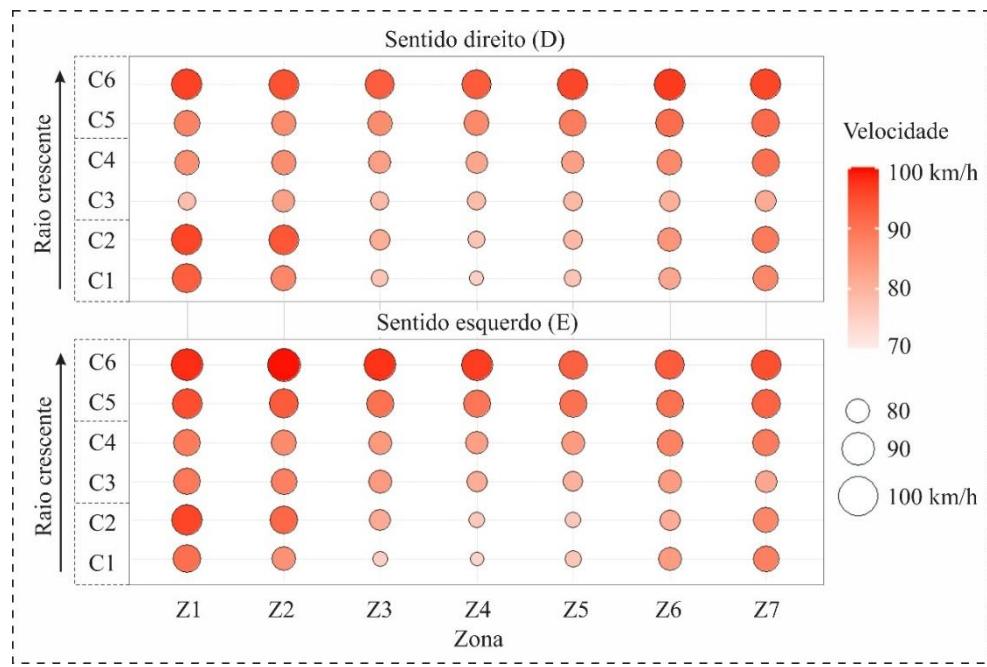
Com relação ao levantamento planialtimétrico, nas tangentes as inclinações variam de 0% a 6,2%. Já no interior da curva (Z3, Z4 e Z5), C1, C2, C4, C5 e C6 apresentam inclinações aproximadamente constantes, com máxima de 1,7%. A C3 é exceção com inclinações relativamente constantes em duas zonas da curva (1,4%). Porém, uma zona apresenta inclinações que variam de +5,1% para -1,4% (curva vertical convexa). É importante ressaltar que essa variação representa uma mudança de acrivo para declivo (e vice e versa) no interior da curva horizontal.

De acordo com o manual de projeto geométrico do DNER (1999), inclinações longitudinais podem variar, no máximo, entre 4,5 e 8% para terrenos ondulados. Contudo, não há informações do fluxo da BR-427, por isso, não há como indicar, com precisão, qual a rampa máxima sugerida pelo manual. Apesar disso, se a rodovia for considerada com características técnicas mínimas suficientes e com volume médio diário de 50 veículos, todas as inclinações longitudinais estão dentro do limite dos parâmetros de segurança sugeridos pela norma.

Para Lamm *et al.* (1999), DER (2006) e AASHTO (2018) e Wang e Wang (2018) deve haver concordância entre curvas horizontais e verticais. Para os autores, se houver variação da inclinação vertical no interior da curva horizontal, ela deve ser constante e seguir

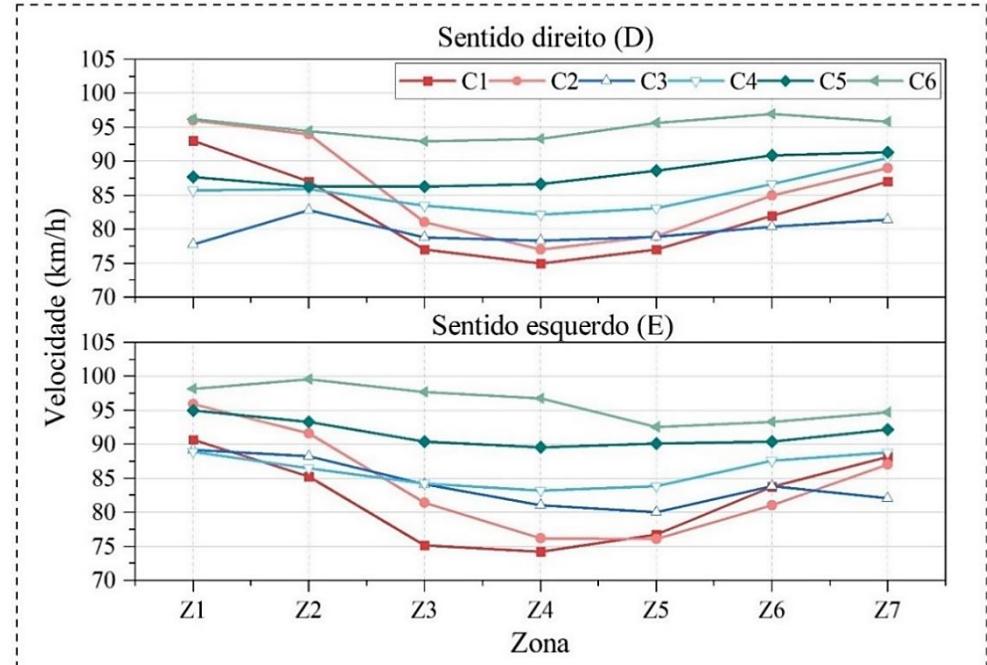
por toda a curva. Na Figura 58 é mostrada uma matriz com as velocidades médias de todas as curvas. Já na Figura 59, o gráfico de linhas com esses mesmos valores.

Figura 58 - Matriz das velocidades médias para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 nos sentidos D e E.



Fonte: Autor.

Figura 59 - Velocidades médias dos condutores nas curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6, nos sentidos Direito (D) e Esquerdo (E).

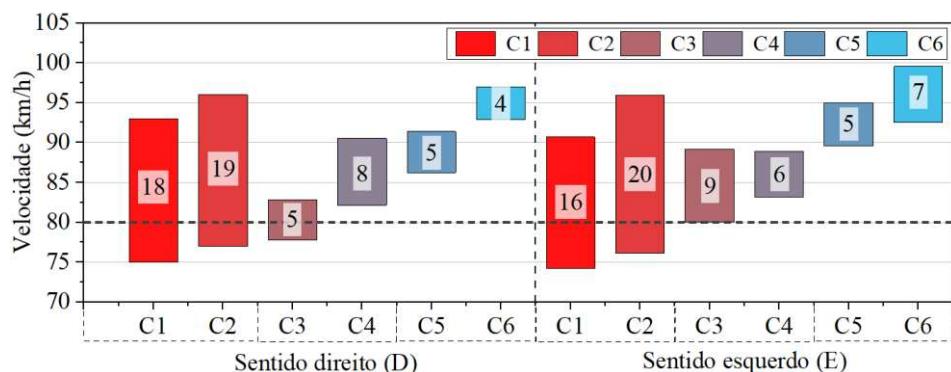


Fonte: Autor.

De acordo com a análise da Figura 58 e Figura 59, os condutores têm comportamentos similares na tangente de entrada (Z1 e Z2), com variações entre 78 e 100km/h. Na zonas Z3, Z4 e Z5, são observadas variações diferentes – à medida que o raio da curva cresce, a velocidade dos motoristas tende a aumentar. A C1 e C2 variam entre 74 e 81 km/h; a C3 e C4, entre 78 e 84 km/h e a C5 e C6, 86 e 98 km/h. Na tangente de saída (Z6 e Z7), os comportamentos são similares às curvas, porém, com variações menores. Conforme esperado, observou-se que as velocidades máximas ocorrem nas tangentes; enquanto as mínimas, nas curvas. De modo geral, curvas com raios entre 100-200 m demonstraram maiores variações de velocidades (diferença entre a velocidade na tangente e na curva). Além disso, as tendências das velocidades nos sentidos D e E seguem próximas.

Na Figura 60 são mostradas das variações das velocidades dos condutores em cada curva. Na face inferior e superior do gráfico são mostradas as mínimas e as máximas absolutas observações para cada curva, respectivamente. Na parte interna, são mostradas as variações da velocidade, em km/h. A linha tracejada horizontal representa o limite de velocidade da via, 80 km/h.

Figura 60 – Máximas, mínimas e variação das velocidades para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6.



Fonte: Autor.

Curvas de raio entre 100-200 m têm variações mais altas comparadas às curvas entre 200-500 m (de 16 a 20 km/h e de 4 a 9 km/h, na sequência). A C3 no sentido E apresentou a maior variação entre curvas de raio entre 200-500 m, de 9 km/h. Esse comportamento corrobora com a avaliação da velocidade para essa curva e esse resultado pode estar relacionado à associação entre a inclinação longitudinal da via e a direção defensiva (Figura 61).

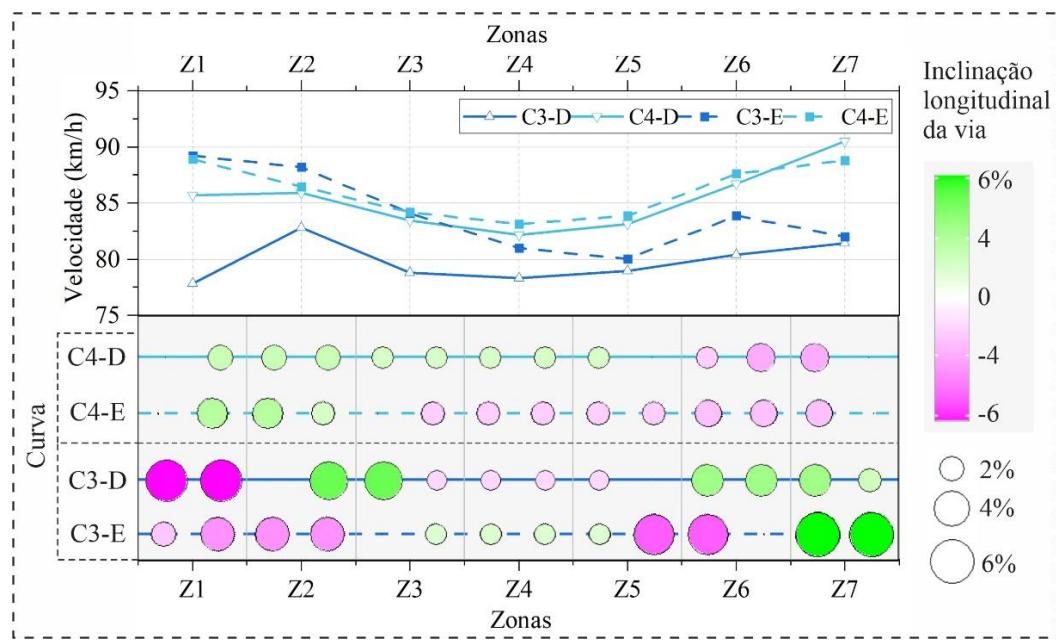
Avaliando a velocidade (Figura 60), a C1 teve variação similar a C2. Enquanto a C3 teve variações inferiores à C4 (iguais a 5 e 8 km/h, respectivamente). Esses resultados podem

indicar que curvas verticais convexas na primeira zona da curva (Z3) influenciam a percepção e induz o condutor a realizar uma direção mais defensiva e cautelosa. Esses resultados também coincidem com as análises citadas por Bella (2014). A autora realizou uma pesquisa envolvendo a combinação de curvas horizontais e verticais e avaliou que a saída de curvas verticais coincidindo com a entrada curvas horizontais podem estar influenciar a percepção do motorista e ocasionar variação de velocidade.

Nesse contexto, Lamm *et al.* (1988) também citaram que mudanças bruscas na velocidade de operação, para se ajustar ao alinhamento horizontal e vertical, são comportamentos comuns e podem estar relacionados aos sinistros de trânsito. Os autores mencionam que os projetistas franceses, alemães, suecos e suíços já buscavam harmonizar a velocidade de projeto e a velocidade de operação para proporcionar segurança dinâmica de direção à época.

Apesar das curvas de raio 100-200 m apresentarem variações superiores às demais, há tendências de aumento da velocidade com o raio crescente, a C3, que possui raio intermediário, foi a exceção. Na Figura 61 são mostradas as velocidades e inclinações longitudinais da C3 e C4.

Figura 61 - Velocidades e inclinações longitudinais das curvas C3 e C4.



Fonte: Autor.

Na tangente de entrada da C3, sentido D, foi observada a maior rampa descendente dentre todas as curvas, igual a -6,2%. A velocidade nesse trecho foi de 78 km/h,

aproximadamente. Na mesma zona da C4, a velocidade foi de 89 km/h. Entre as zonas Z1, Z2 e Z3 da curva C3, as velocidades foram 78, 83 e 79 km/h, na sequência. Com relação às inclinações, há uma rampa descendente de -6,2% entre a Z1 e Z2 e muda para ascendente de +5,1% entre a Z2 e Z3 (curva vertical convexa). Isso pode ter influenciado a variação da velocidade, já que na rampa ascendente houve aumento da velocidade, enquanto na descendente, diminuição. Na C4, a máxima inclinação é de 2,9% e as variações de velocidades foram próximas de 2 km/h.

Apesar da C3 apresentar variações atípicas na velocidade, nenhum sinistro de trânsito foi verificado nessa curva. Por outro lado, na C4, ocorreram 2 registros. Nessas curvas, o ajuste de velocidade também pode estar relacionado com a direção defensiva por parte do condutor. O estudo realizado por Wang e Wang (2018) avaliou curvas em quatro tipos de configurações, curva horizontal em declive (A), em aclive (B), com curvatura côncava (C) e convexa (D), os autores concluíram que variações verticais em curvas horizontais (tipos C e D) podem indicar mudança de comportamento do condutor e influenciar na variação da velocidade. A curva C3 deste estudo tem uma curva vertical convexa na primeira zona da curva (Z3 do sentido D) e o ajuste de velocidade anterior à curva para esse tipo de geometria também foi concluído no estudo de Wang e Wang (2018). Em curvas verticais convexas, os condutores tendem a ter percepções de inclinações longitudinais mais acentuadas do que realmente é e esse fato induz a uma direção defensiva do condutor.

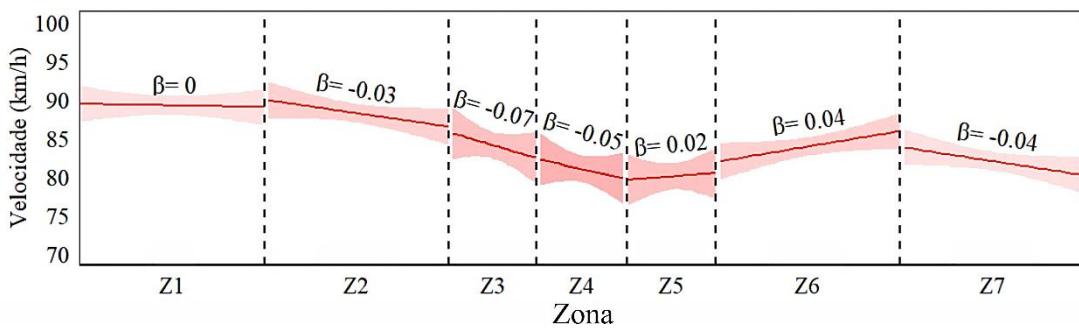
Os resultados dessas análises demonstram que curvas de raio entre 100-200 m são as que têm maior amplitude de velocidade (entre 74 e 96 km/h), sendo as que apresentam maiores índices de variação de velocidade. Esses dados possivelmente apontam que, nas curvas de raio entre 100-200 m, os condutores não seguem padrões constantes de velocidade e esse fato deve ser avaliado com cautela. Um dos critérios para parâmetros geométricos da via é o desenvolvimento do trajeto com velocidade constante DER (2006) e AASHTO (2018).

Além da avaliação dos critérios de variação da velocidade e de sua relação com o raio da curva, é importante também compreender a sua distribuição de acordo com a zona da curva. Paralelo a isso, avaliar a intensidade dessa variação também é essencial. Por esse motivo, este estudo avaliou esse parâmetro considerando a intensidade da aceleração ou desaceleração de acordo com cada zona da curva.

5.2. Intensidade da Variação da Velocidade, Inclinações Longitudinais e Raio de Curva

Para avaliar a intensidade da aceleração e da desaceleração, foi traçada uma linha de tendência baseada em todas as observações para a mesma curva, nos sentidos D e E. Na Figura 62 é mostrada a análise para a curva C3 no sentido E. No exemplo, são mostrados os coeficientes angulares de inclinações das linhas de tendências para cada zona (β) e um intervalo de tendência da velocidade com 95% de confiança (em vermelho). O coeficiente positivo representa aceleração do condutor; enquanto o negativo, desaceleração. Quanto mais brusco o movimento, maior o coeficiente angular da velocidade.

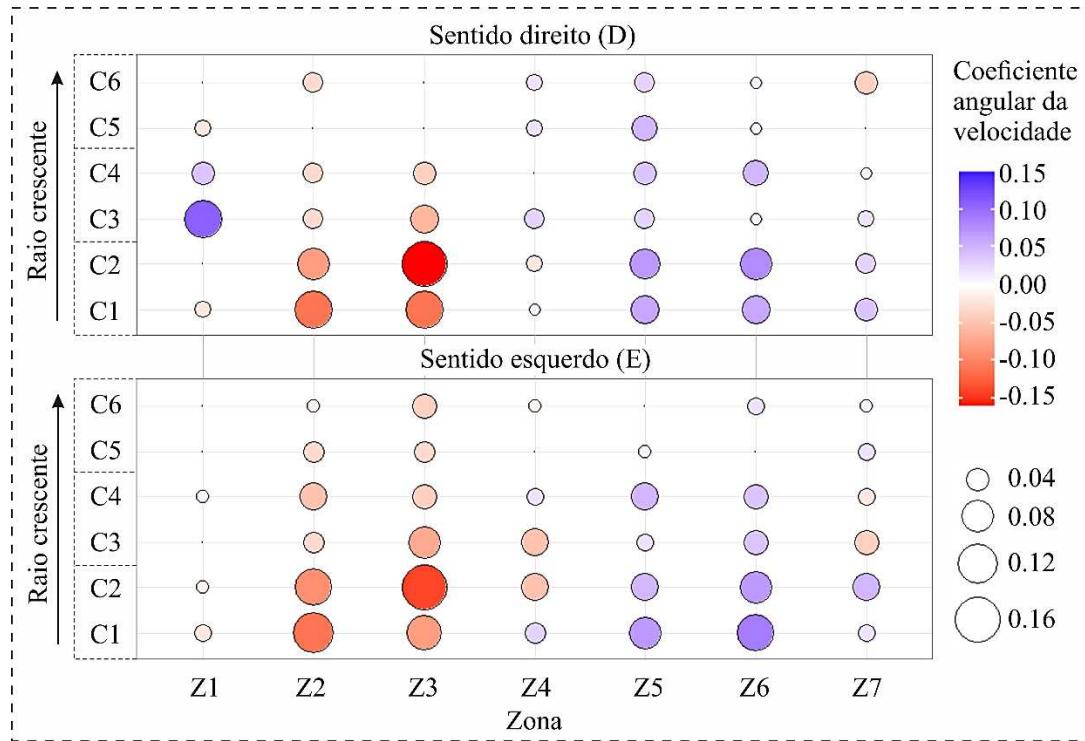
Figura 62 - Linha de tendência e coeficientes angulares das velocidades para a curva C3, sentido E.



Fonte: Autor

No exemplo da Figura 62 os condutores se mantêm velocidades constantes na primeira zona da tangente (Z1) e desaceleraram na tangente de entrada da curva (Z2) com a intensidade de -0,03. Na primeira zona da curva (Z3), a desaceleração atinge o nível mais alto, igual a -0,07. No centro da curva (Z4), o condutor ainda desacelera, porém, com menor intensidade, igual a -0,05. Na saída da curva (Z5), os condutores mudam de desaceleração para aceleração e na intensidade de 0,02. Na tangente de saída (Z6), os condutores continuam acelerando na intensidade de 0,04. Porém, na última zona da tangente (Z7), os condutores desaceleram na intensidade -0,04. Esse resultado em particular da Z7, para esta curva, pode estar relacionado com o acrivo de 6,2% (Figura 56). Na Figura 63, é mostrada uma matriz com os coeficientes angulares das velocidades de todas as curvas e todas as zonas.

Figura 63 - Matriz de coeficientes angulares da velocidade para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 nos sentidos D e E.



Fonte: Autor

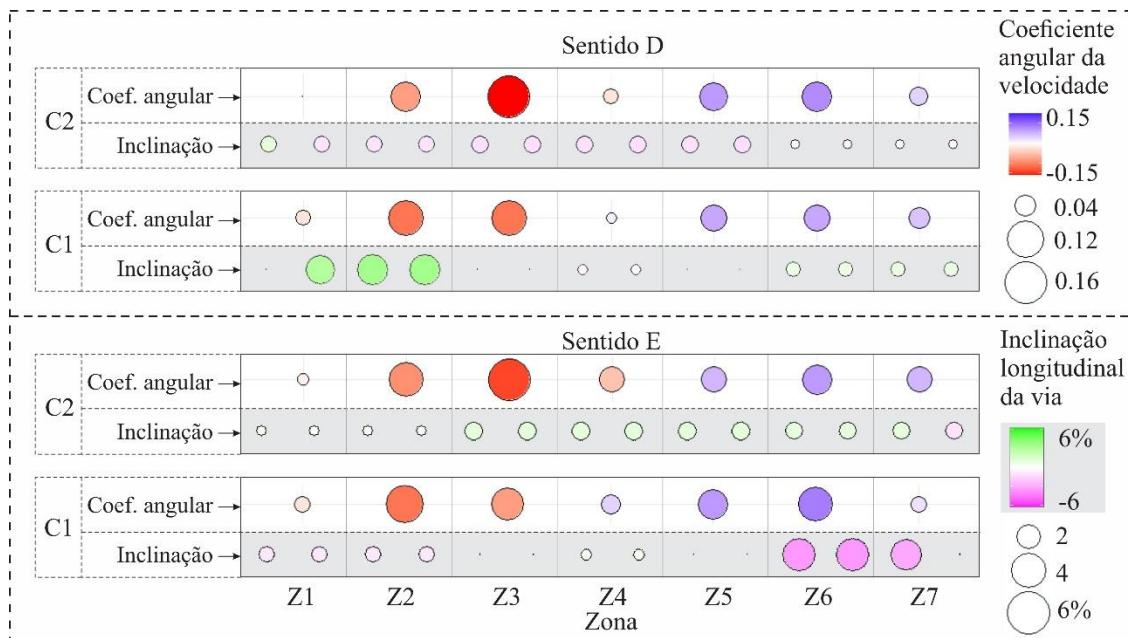
De acordo com a análise da Figura 63, os condutores seguem padrões semelhantes entre as curvas. Eles tendem a se manter constantes na Z1, desaceleraram na tangente de entrada (Z2) e na primeira parte da curva (Z3). No centro (Z4), o comportamento varia entre desaceleração e aceleração. Posteriormente, há uma tendência à aceleração na última zona da curva (Z5) e na tangente de saída (Z6). Na última tangente (Z7), a velocidade segue próxima da constante.

Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Almeida, Vasconcelos e Bastos Silva (2018). A pesquisa envolveu 284 observações em 47 curvas com raios entre 40 e 500 m. Os autores concluíram que as velocidades nas curvas não são constantes e que a maior parte das desacelerações e acelerações ocorrem dentro da curva. As investigações foram realizadas em pista de mão dupla e, apesar disso, foram observadas semelhanças com essa pesquisa.

De modo geral, curvas de raios entre 100-200 m apresentaram intensidades de desaceleração altas, comparadas aos demais. Na zona Z3 e sentido D, as curvas C1 e C2 apresentaram intensidades máximas de -0,11 e -0,16 (na sequência), enquanto a C3, C4, C5 e C6, intensidades de -0,06, -0,04, 0,0 e 0,0, sequencialmente. Pesquisas (Bobermin; Ferreira,

2021; Santos; Oliveira; Larocca, 2022;) têm mostrado que curvas com raios pequenos (aproximadamente 150 m) apresentam maior probabilidade de ocorrência de sinistros, comparadas às curvas de raios superiores. Esse fato pode estar relacionado à intensidade da desaceleração. Na Figura 64 são mostrados os coeficientes angulares da velocidade e as inclinações longitudinais para as curvas de raios C1 e C2 (raios entre 100-200 m).

Figura 64 - Coeficientes angulares da velocidade e as inclinações longitudinais para as curvas de raios C1 e C2, sentidos D e E.



Fonte: Autor.

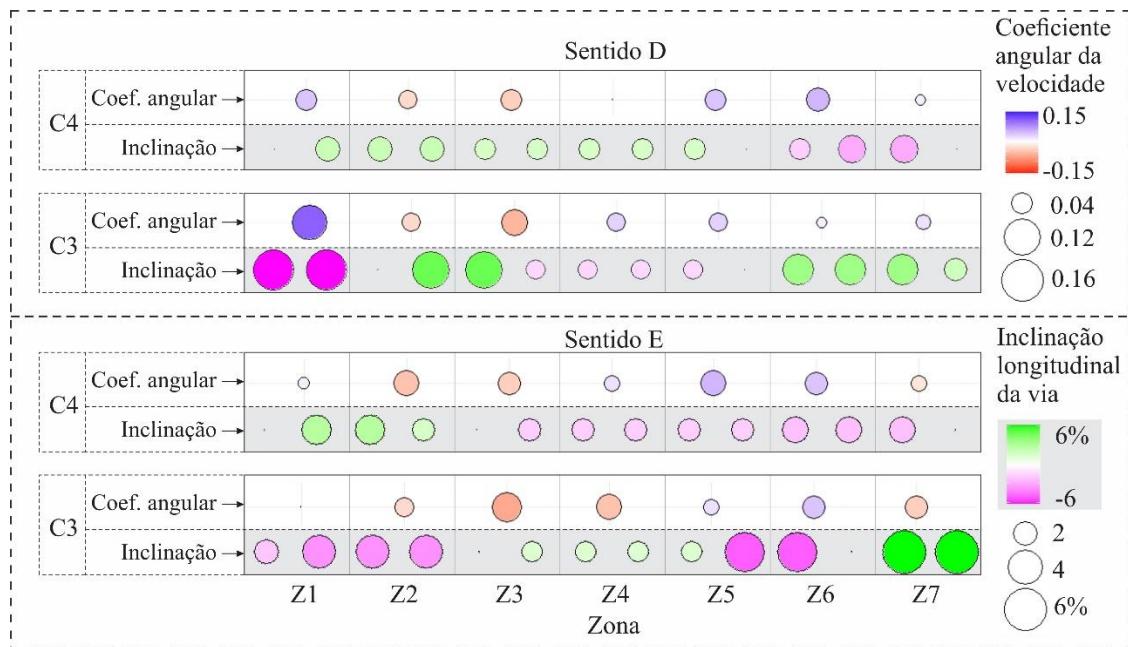
Apesar das curvas C1 e C2 apresentarem características geométricas semelhantes, os resultados mostraram maiores intensidades de desaceleração para a C2 na primeira zona da curva, Z3 (-0,16 e -0,14 para C2, e -0,11 e -0,08 para a C1, nos sentidos D e E, na sequência). No centro da curva (Z4), foram observadas tendências diferentes entre as curvas. Enquanto na C2 os condutores desaceleraram com a intensidade de -0,02 e -0,05. Na C1 houve aceleração na intensidade de 0,01 e 0,03 (sentidos D e E, na sequência).

Com relação às inclinações longitudinais da via, Na C1, as inclinações variam entre 0 e 3,5%, enquanto na C2, entre 0,3 e 1,1%. Contudo, os coeficientes angulares da velocidade mostraram tendências semelhantes entre a C1 e C2. Na Z2 do sentido D, por exemplo, a C1 tem rampa ascendente de 3,5% e desaceleração de -0,11. Na C2, há uma rampa descendente de -1,1% e, apesar disso, também houve desaceleração de -0,08. A análise sugere que, para essas curvas, a inclinação longitudinal da via não explica a intensidade da aceleração ou da desaceleração e essa variável pode estar relacionada ao raio da curva.

Lamm *et al.* (1988) afirmam que curvas acentuadas após tangentes longas podem induzir a diferenças acentuadas entre velocidade de projeto e operação, e esse fato pode indicar alinhamentos inconsistentes. Esse estudo focou apenas em curvas isoladas, isto é, tangentes de entrada superiores a 250 m. Uma das explicações para a intensidade da desaceleração para a C2, considerando que as inclinações são relativamente planas, pode ser a teoria citada por Lamm *et al.* (2018).

A análise individual das curvas mostra algumas divergências para a C3. No sentido D, a curva apresentou intensidade de aceleração relativamente alta para a Z1 (0,11), divergindo das demais curvas. Na Figura 65 são mostrados os coeficientes angulares da velocidade e as inclinações longitudinais para as curvas de raios C3 e C4 (raios entre 200-300 m).

Figura 65 - Coeficientes angulares da velocidade e as inclinações longitudinais para as curvas de raios C3 e C4, sentidos D e E.



Fonte: Autor.

A C4 segue as mesmas tendências de aceleração e desaceleração das outras curvas. Desaceleração na tangente de entrada e primeira zona da curva (Z2 e Z3) e aceleração no centro, no fim da curva e na tangente de saída (Z4, Z5 e Z6, na sequência). Na C3, os coeficientes angulares das velocidades parecem ser resposta da inclinação longitudinal da via. Na Z1 do sentido D, a curva C3 tem uma rampa descendente de -6,2% e a aceleração foi de 0,11; na C4, há rampa ascendente de 2,2% e aceleração de 0,04. No trajeto do sentido oposto dessa zona (Z7

para o sentido E), a inclinação da C3 passa a ser um aclice de 6,2% e a desaceleração foi de -0,04, enquanto a C4 tem um declive de 2,2% e ainda assim houve desaceleração de -0,02.

Os resultados da análise mostram que inclinações longitudinais acentuadas em tangentes (acima de 5,0%) podem influenciar no padrão de condução e na intensidade da aceleração e desaceleração do motorista. Apesar disso, a curva de raio entre 200-300 m que apresentou mais sinistros foi a C3, com inclinações e intensidade de desaceleração inferiores à C4. Esses dados corroboram com a análise de que inclinações longitudinais acima de 5,0% induzem a direção defensiva do condutor. Resultados semelhantes também foram avaliados na pesquisa de Wang e Wang (2018). Os autores afirmam que nas curvas verticais côncavas e convexas como a C3, os condutores tendem a realizar uma direção defensiva e, consequentemente, diminuem a velocidade.

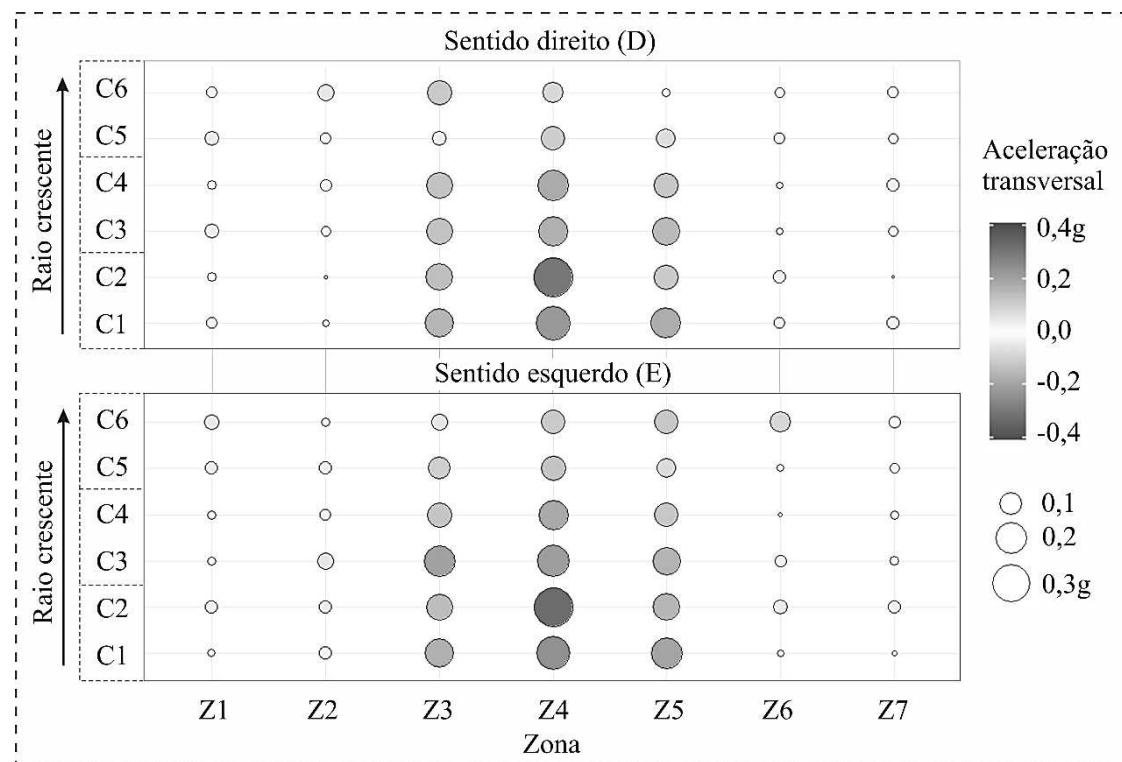
Para Tanishita e Van Wee (2017), variações de velocidade de 25 km/h, aproximadamente (de 110 para 85 km/h e 65 para 90 km/h), indicam maior possibilidade de sinistros. Os autores investigaram 142 amostras de veículos e 78 sinistros. Para eles, perturbações externas ou inconsistências no projeto que modifiquem a velocidade, podem resultar em sinistros de trânsito. Com base nesses critérios, esse estudo não constatou variações acima de 25 km/h (Figura 60), apesar disso, foram percebidas incidências de desacelerações altas para as zonas de entrada e primeira parte da curva (Z2 e Z3), em média 0,15.

Este estudo avaliou condição de fluxo livre, sem a influência de outros veículos. Portanto, a geometria da via pode estar relacionada ao comportamento do condutor. Para entender melhor o fenômeno envolvendo geometria da via e padrão de condução, esta pesquisa investigou a análise da aceleração transversal do condutor em conjunto com as variáveis que estão sendo discutidas.

5.3. Efeito da Geometria da Via e Velocidade do Condutor na Aceleração Transversal

Na Figura 66 é mostrada uma matriz com as acelerações transversais. Aceleração positiva indica curva à Direita (sentido D); aceleração negativa, curva à Esquerda (Sentido E). Para cada zona, as curvas estão na sequência crescente do raio, da C1 a C6.

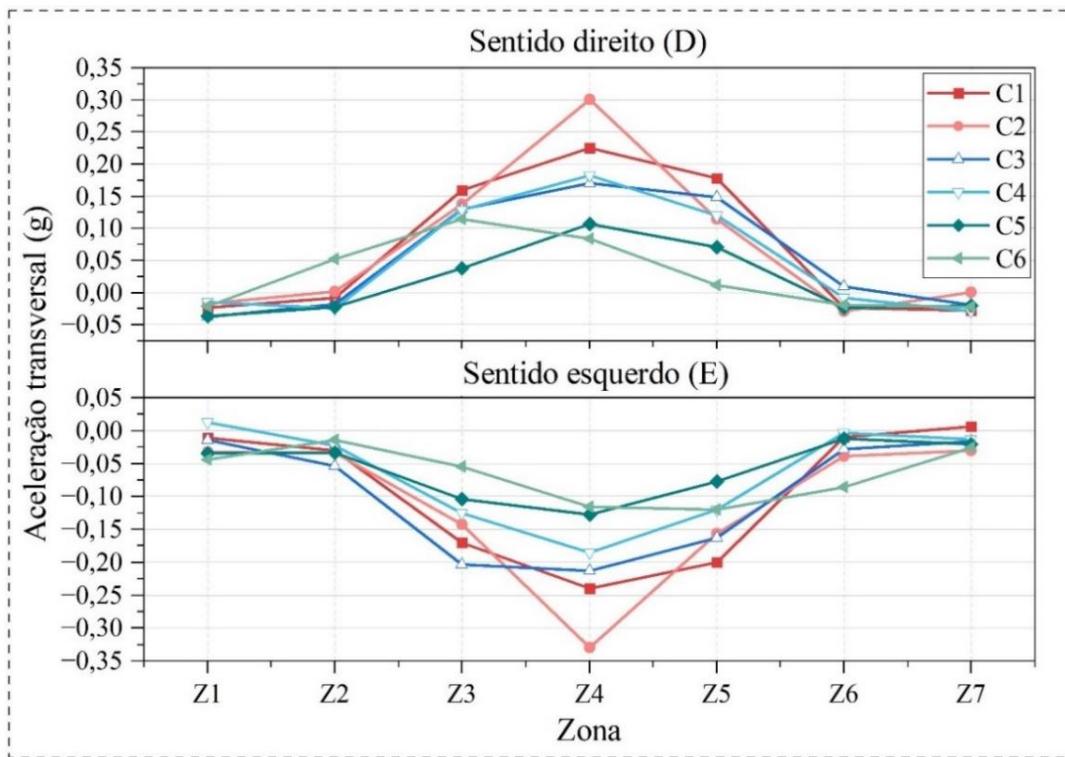
Figura 66 - Matriz de acelerações transversais para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6 nos sentidos D e E.



Fonte: Autor.

De acordo com a análise da Figura 66, as acelerações transversais para as tangentes de entrada e saída (Z1, Z2, Z6 e Z7) permanecem próximas de zero, o que era esperado, pois trechos retos possivelmente não demandam variações laterais do condutor. No interior da curva, a aceleração transversal tende a aumentar da primeira zona (Z3) até o centro da curva (Z4) e atinge a maior medida. Na última zona da curva (Z5), a aceleração retorna à próxima de zero. Na Figura 67 são mostradas as acelerações transversais dos condutores nas curvas em análise.

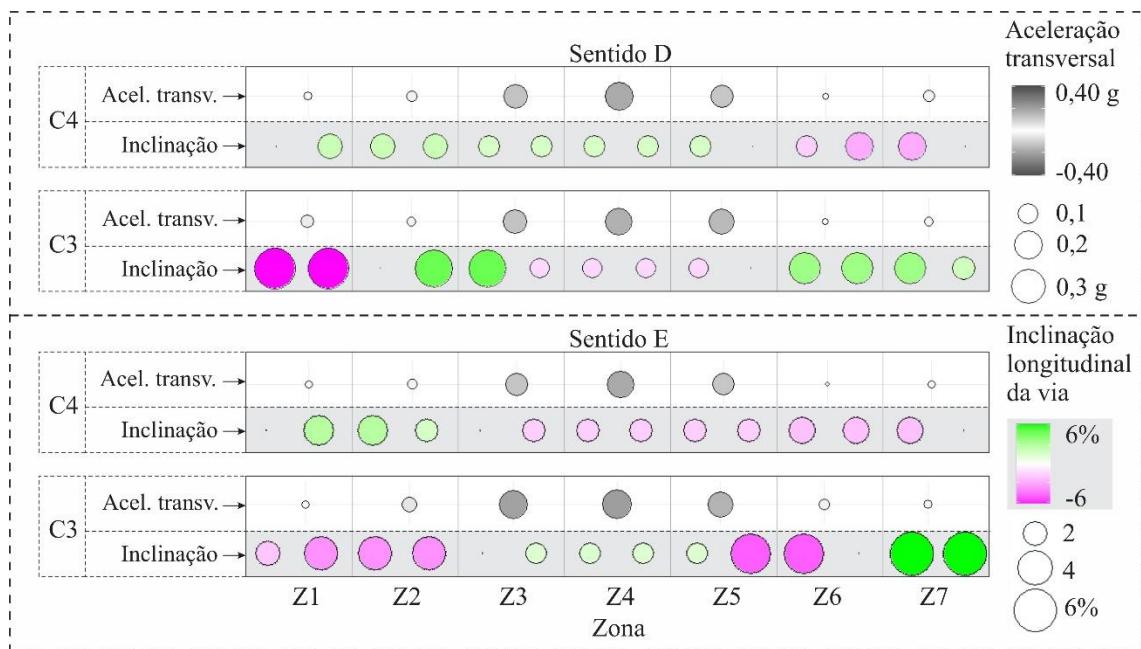
Figura 67 - Acelerações transversais dos condutores nas curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6, no sentido a) à direita D e b) à esquerda E.



Fonte: Autor.

Em relação ao tamanho do raio, notou-se que curvas de raios menores tendem a ter acelerações transversais maiores que às demais no centro da curva: curvas com raios entre 100-200 m têm acelerações máximas de 0,30 g, em média, as que possuem raios entre 200-300 m têm acelerações máximas de 0,20 g, enquanto aquelas que têm raios entre 400-500 m, 0,10 g. Raios menores tendem a ter acelerações transversais superiores, no entanto, a C3 foi exceção nesse sentido, pois as acelerações nas zonas da curva (Z3, Z4 e Z5) foram superiores às da C4 (curva com classe de mesmo raio). O resultado das acelerações para a C3, em particular, pode ter sido influenciado pela inclinação da via. Na Figura 68 são mostradas as inclinações longitudinais e acelerações transversais da C3 e C4, nos sentidos D e E.

Figura 68 - Inclinações longitudinais e acelerações transversais das curvas C3 e C4.



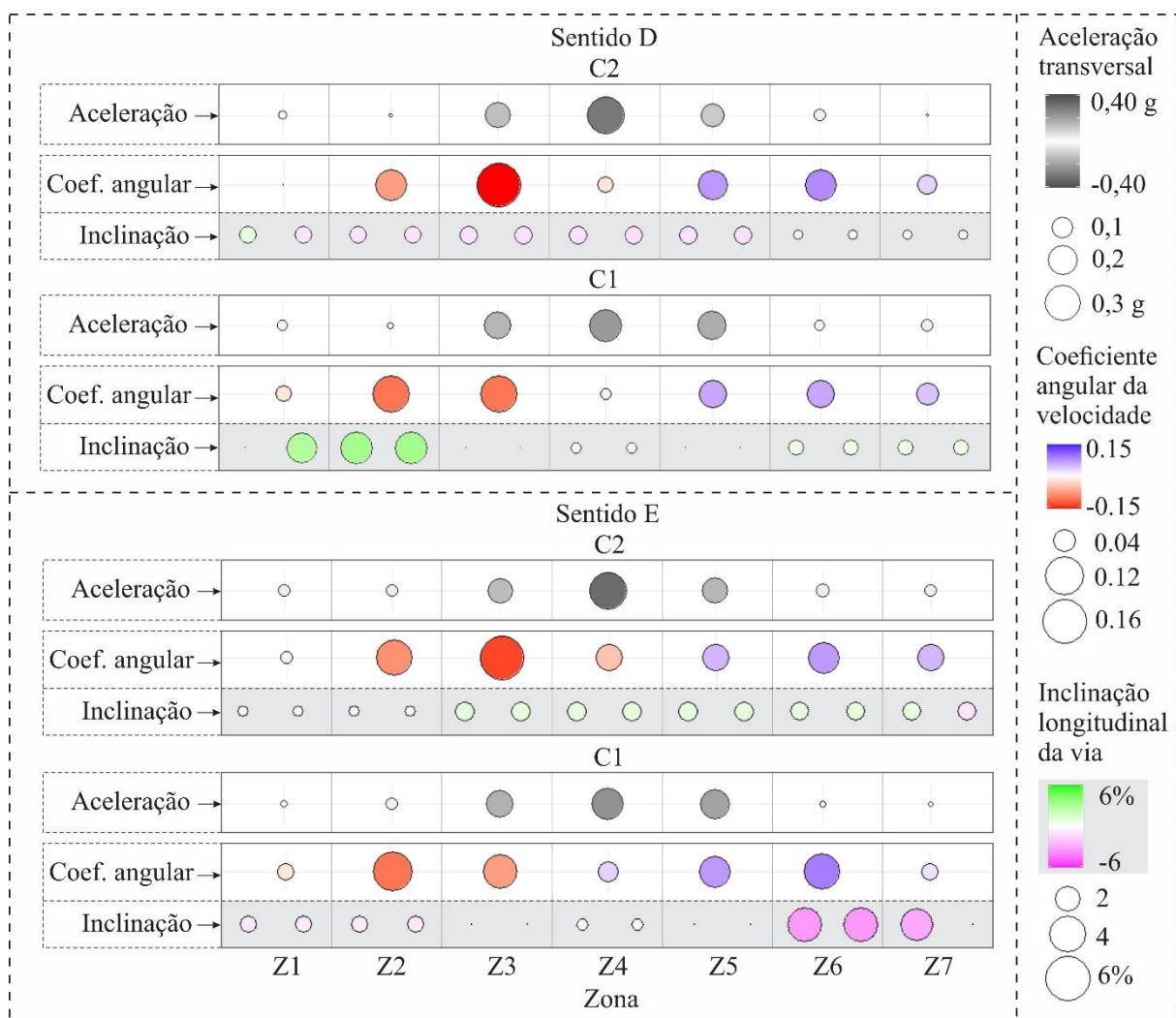
Fonte: Autor.

A inclinação máxima na C3 é de 6,2%, enquanto na C4 é de 2,9%. No sentido E, foi observada uma mudança de acente para declive nas zonas Z2 e Z5 da curva C3, essa característica pode ter impacto no padrão de condução e ocasionado movimentos transversais mais acentuados nas zonas Z2, Z3, Z4 e Z5, comparado à C4.

Os resultados da análise sugerem que inclinações longitudinais acentuadas (acima de 5,0%) também podem influenciar na aceleração transversal do motorista. Possivelmente, as mudanças de acente para declive (curva vertical convexa) podem ser reflexo da falha na coordenação dos alinhamentos horizontal e vertical, e isso pode ter ocasionado variações laterais atípicas, resultados também observados por Tanishita e Van Wee (2017).

Com relação às curvas de raios menores (C1 e C2), foram observadas acelerações transversais diferentes apesar da semelhança geométrica. A C2 apresentou acelerações transversais superiores à C1 em, aproximadamente, 0,08 g para os dois sentidos. Na Figura 69, são mostradas as acelerações transversais, coeficientes angulares das velocidades e inclinações da via para as curvas C1 e C2.

Figura 69 - Acelerações transversais, coeficientes angulares das velocidades e inclinações longitudinais para as curvas C1 e C2.



Fonte: Autor.

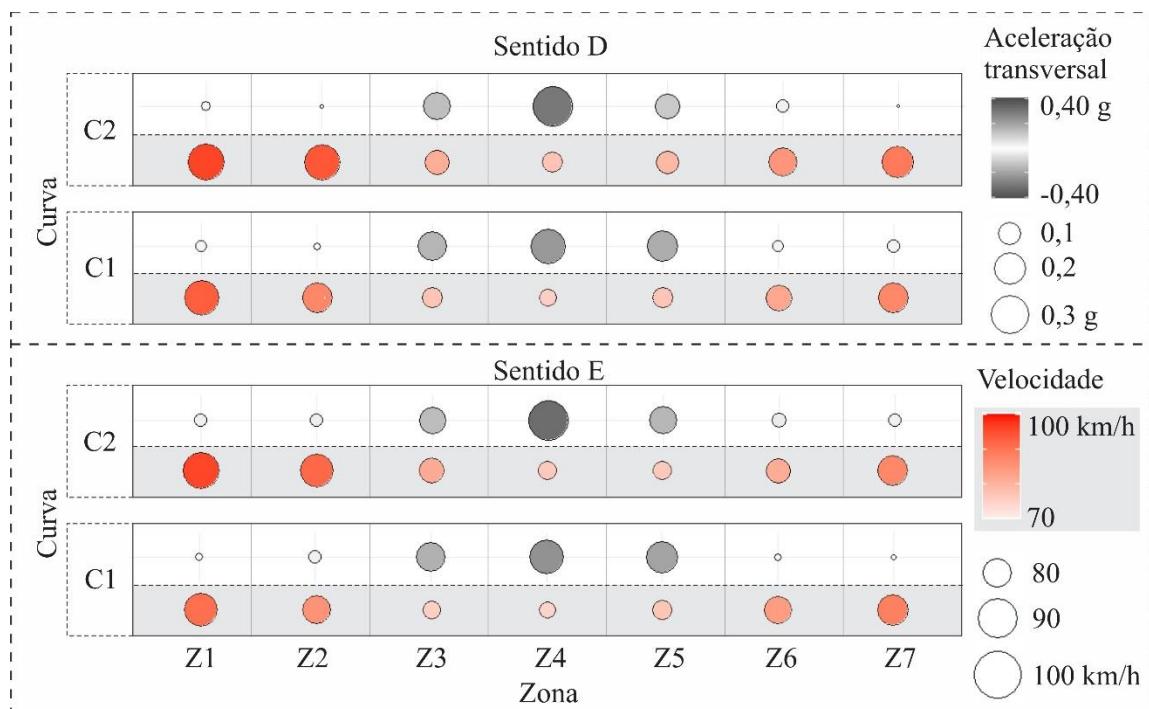
Com relação à geometria, a C2 tem inclinação constante de 1,1% nas tangentes e na curva. A C1 possui inclinações de 0,4% na curva e de 0,8 e 3,5% nas tangentes. Em relação às velocidades, a C2 mostrou tendências superiores à C1 em todas as zonas da curva nos dois sentidos (Z3, Z4 e Z5), com diferença de 0,3 km/h. Como possível consequência, a intensidade de desaceleração da C2 foi superior à C1 em 0,05 g, aproximadamente (-0,16 para a C2 e -0,11 para a C1 no sentido D, por exemplo).

Esses resultados também corroboram com os estudos de Bella (2014) e Wang e Eang (2018). Para esses autores, inclinações longitudinais que caracterizem curvas côncavas e convexas podem indicar direção defensiva do condutor e ajuste de velocidade nas tangentes de entrada. Esse comportamento é observado neste estudo, a C2 apresentou intensidade de desaceleração superiores à C1 na tangente de entrada da curva (Z2) nos dois sentidos. Como

consequência desse padrão de condução, as acelerações transversais na C2 são superiores à C1 na curva.

Por outro lado, estudos conduzidos por Dhahir e Hassan (2019a) indicaram que curvas horizontais com raios próximos a 140 m tendem a ter velocidades baixas e, portanto, acelerações transversais baixas. Contudo, os resultados desse estudo mostraram que, embora as velocidades em curvas de raio entre 100-200 m sejam menores do que em curvas com raios maiores, as acelerações transversais para essas curvas foram superiores às demais no centro da curva (Z5). Na Figura 70 são apresentadas as acelerações transversais e velocidades para as curvas de raio entre 100-200 m (C1 e C2), nos sentidos D e E.

Figura 70 - Acelerações transversais e velocidades para as curvas C1 e C2.



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 70, observou-se que nas tangentes de entrada e saída (Z1, Z2, Z6 e Z7), a velocidade é 88 km/h, em média. No interior da curva, há uma redução de 5 km/h e atinge a média de 83 km/h, aproximadamente. Com relação às acelerações laterais, acontece o inverso: nas tangentes, seguem próximo de 0 g, aumentam nas zonas da curva (Z3, Z4 e Z5) e atinge acelerações máximas próximas a 0,33 g na Z4. Há uma tendência de aumento da aceleração transversal à medida que a velocidade diminui e esse comportamento é observado principalmente nas zonas das curvas. Nesse contexto, é importante avaliar a aceleração transversal de acordo com a velocidade do condutor.

Dhahir e Hassan (2018) realizaram um estudo com aproximadamente 3.700 viagens em 62 curvas horizontais, das quais 33 foram realizadas em terrenos ondulados e 29, em terrenos montanhosos. As curvas avaliadas tinham raios entre 146 e 873 m. Os autores partiram da hipótese de que o condutor está em condições de conforto quando a velocidade é constante. Com base nisso, os critérios para considerar velocidades constantes foi de aceleração longitudinal inferior a $0,1 \text{ m/s}^2$ e igualdade estatística. Como resultado, os autores avaliaram as médias das mínimas acelerações transversais em velocidades constantes e definiram que um limite de $0,15 \text{ g}$ é considerado satisfatório. Nesse mesmo raciocínio, no ano de 2019, os mesmos autores citam que variações de $0,20 \text{ g}$ podem indicar desconforto do motorista (Dhahir e Hassan, 2019).

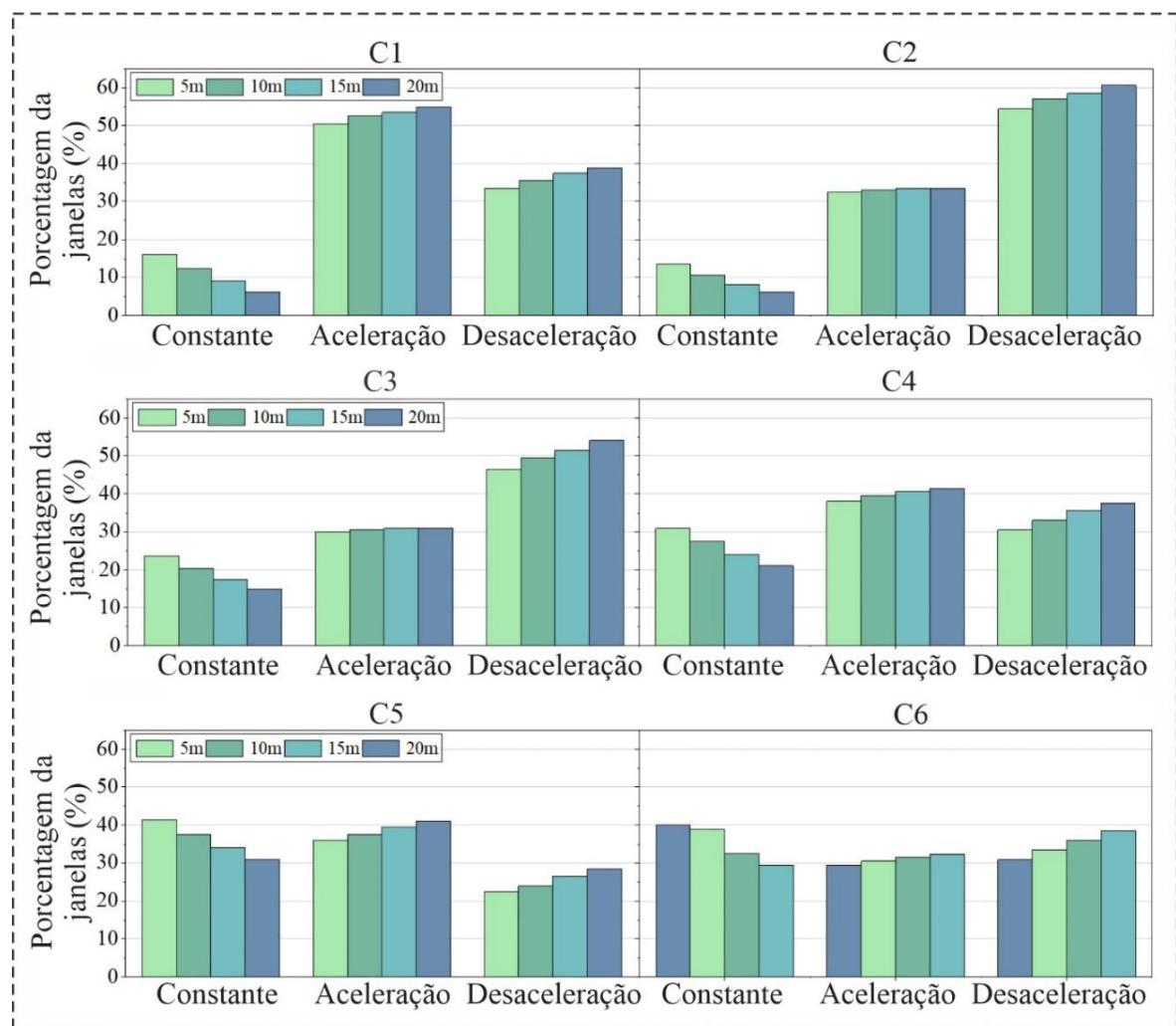
Neste estudo, a velocidade tem mostrado influência na aceleração transversal. As investigações de Dhahir e Hassan (2018) são importantes para corroborar com as análises. Apesar da amplitude do estudo, os autores não avaliaram a inclinação longitudinal da via como possível variável explicativa. Além disso, o limite da aceleração transversal confortável é definido com base na média das amostras em curvas de diversos raios.

As descobertas deste estudo mostraram que curvas de raios entre 100-200 m e 200-300 m apresentam acelerações máximas entre $0,30$ e $0,18 \text{ g}$, respectivamente, e esses valores podem ser considerados acima do limite estabelecido pela literatura. Apesar disso, curvas que não apresentaram sinistros mostraram acelerações transversais de $0,22$ e $0,17 \text{ g}$ (C1 e C3, na sequência). Esses dados sugerem que, apesar de não haver sinistros, as acelerações estão acima do limite do conforto. Nesse contexto, também é importante avaliar as curvas de acordo com a classe de raios.

5.4. Análise do Conforto do Motorista em Curvas Horizontais

Avaliar o padrão de condução do motorista é fundamental para compreender o comportamento em curvas horizontais e, a partir disso, indicar parâmetros para o conforto do motorista. Na Figura 71 é mostrada uma análise das porcentagens de janelas flutuantes consideradas constantes, em aceleração ou desaceleração das zonas Z3, Z4 e Z5 para as curvas de C1 a C6.

Figura 71 - Análise da constância das velocidades das zonas Z3, Z4 e Z5 para as curvas C1, C2, C4, C5 e C6 de acordo com as janelas flutuantes de 5, 10, 15 e 20m.



Fonte: Autor.

De acordo com a análise da Figura 71, é observado que à medida que o raio da curva aumenta, as porcentagens de janelas flutuantes constantes também tendem a aumentar. Para curvas de raio entre 100-200 m, em média apenas 10% são consideradas constantes; curvas entre 200-300 m, aproximadamente 20% e para curvas entre 400-500 m, a média é de 30%.

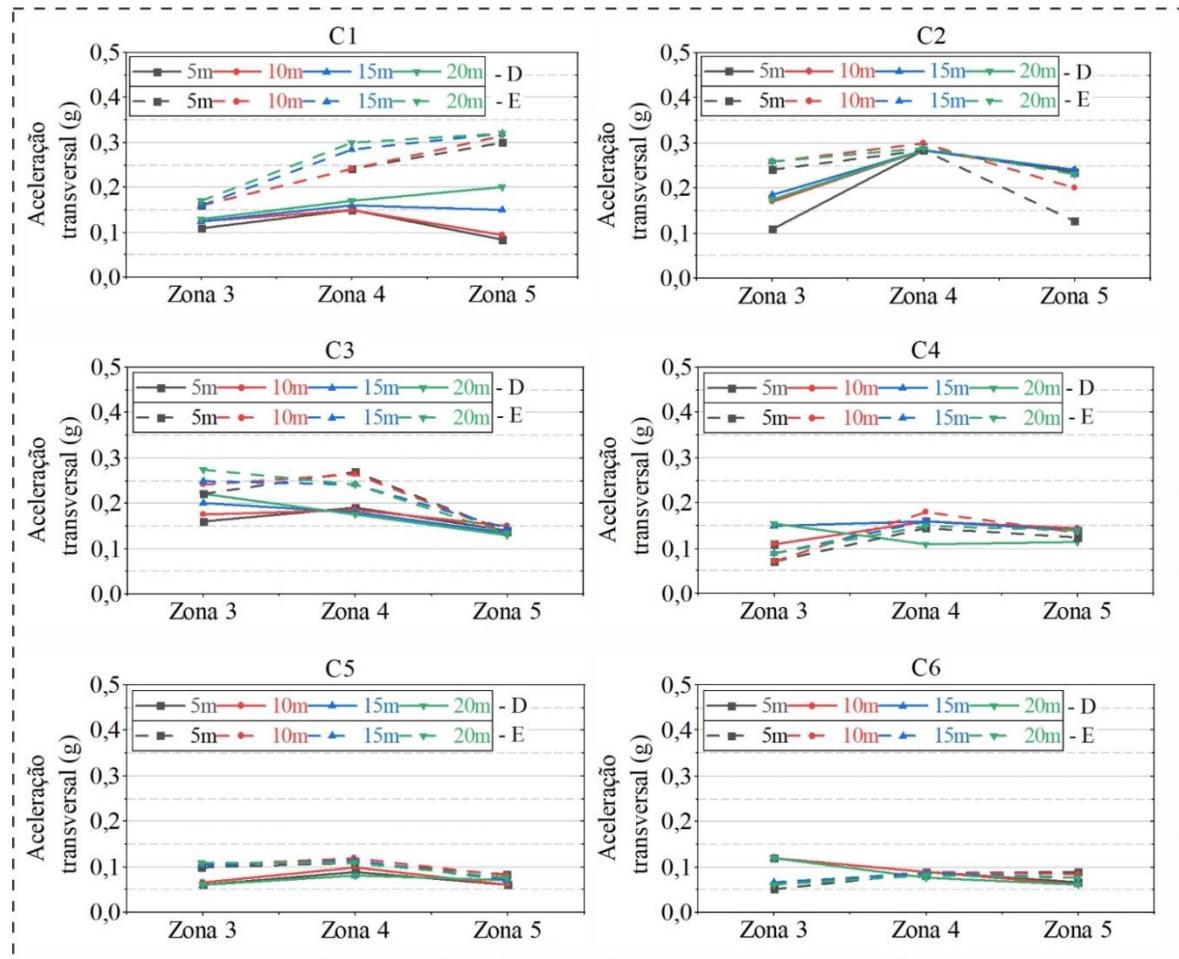
A investigação foi realizada nas zonas da curva (Z3, Z4 e Z5), por esse motivo, esse resultado é esperado. De acordo com a análise do item 5.2, as velocidades apresentam variações maiores nas curvas de raio entre 100-200 m (18 km/h, em média), comparadas às demais (5 km/h, aproximadamente). Esse fato reflete na baixa porcentagem de janelas constantes para essas curvas. No item 5.2, foram avaliadas as intensidades de aceleração e desaceleração. Como resultado, curvas de raio entre 100-200 m apresentaram coeficientes máximos de -0,16 para desaceleração e 0,09 para aceleração, enquanto curvas de raio entre 200-500 m, coeficientes máximos de -0,07 e 0,05 para desaceleração e aceleração, respectivamente. Esse fato também pode refletir em pequenas janelas constantes para as curvas C1 e C2.

Além disso, algumas divergências foram observadas. As curvas C1, C4 e C5 apresentaram majoritariamente janelas com aceleração, 50, 40 e 40% na sequência. Enquanto as curvas C2, C3 e C6, a desaceleração foi maioria com 55, 50 e 35%, sequencialmente. Com relação às constantes, o padrão de aumento da porcentagem para o aumento de raio de curva foi seguido.

Janelas flutuantes pequenas podem capturar poucas observações e resultar em velocidades constantes, o que pode não refletir a realidade. Por outro lado, janelas grandes podem contabilizar muitas amostras e descartar dados valiosos de velocidades constantes (Dahir e Hassan, 2018). Esse estudo propôs a análise de quatro janelas flutuantes: 5, 10, 15 e 20 m. Como esperado, janelas de 5 m apresentaram maiores porcentagens de velocidades constantes para todas as curvas. Já as de 20 m mostraram velocidades constantes inferiores às demais. A diferença entre porcentagens de velocidades constantes entre as janelas de 5 a 20 metros foi de aproximadamente 10% em todas as curvas.

O método desenvolvido por Dahir e Hassan (2018) define o limite de conforto como a média das mínimas acelerações transversais durante janelas constantes. Contudo, a adaptação deste estudo consiste na análise da média das acelerações transversais dentre todas as médias de janelas constantes. Além disso, essas acelerações foram avaliadas nos quatro tamanhos de janelas (5, 10, 15 e 20 m). Na Figura 72 são mostradas as médias das acelerações transversais em janelas de velocidades constantes da curva de C1 a C6. Em cada gráfico são apresentados os dados dos tamanhos das quatro janelas flutuantes para os dois sentidos da via (D e E).

Figura 72 - Limites de acelerações transversais em janelas de velocidades constantes para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6.



Fonte: Autor.

As acelerações transversais máximas ficaram próximas de 0,33 g para curvas de raio entre 100-200 m, 0,27 g para raios entre 200-300 m e 0,12 g para raios entre 400-500 m. Com relação aos sentidos, a C1 foi a que mostrou mais divergência (0,15 g, em média), principalmente na zona de saída da curva (Z5). Por outro lado, curvas entre 400-500 m foram as que mostraram mais acelerações homogêneas com relação ao sentido.

As acelerações não mostraram tendências de acordo com a zona. Contudo, de acordo com a análise da intensidade da aceleração e da desaceleração longitudinal, a média geral mostrou desaceleração na entrada da curva (Z3) e aceleração na saída (Z5), nesse sentido, é provável que as acelerações transversais na Z3 estejam relacionadas com a desaceleração longitudinal.

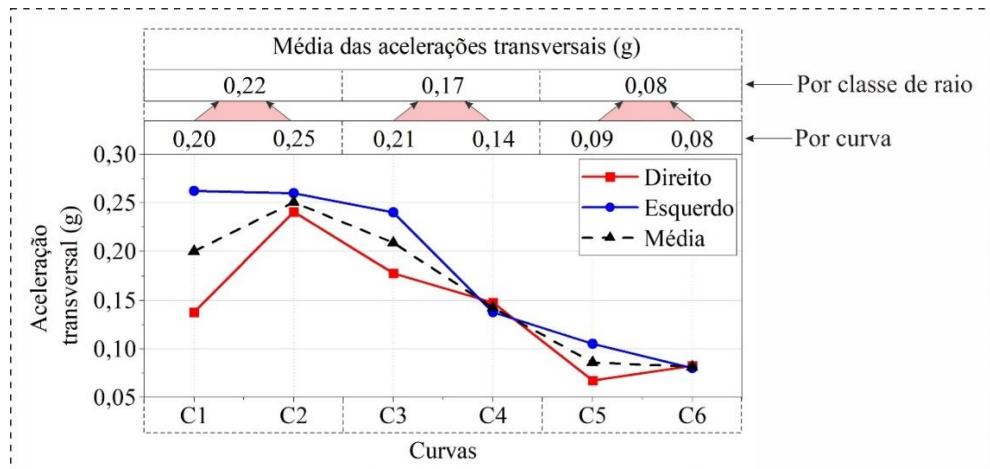
Outros estudos investigam a relação entre tendência de saída de pista e aceleração transversal. Chu *et al.* (2018), por exemplo, desenvolveram um modelo para previsão de

velocidades críticas em curvas. Os autores concluíram que a aceleração de 0,70 g pode elevar a tendência de capotamento em 0,72, numa escala de 0 a 1. Porém, a pesquisa foi feita utilizando ônibus e pode não corresponder às mesmas expectativas para veículos pequenos. Apesar disso, o estudo é importante para compreender melhor o uso dessa ferramenta.

A divergência entre os resultados mostrados nesse estudo e o desenvolvido por Dhahir e Hassan (2018) podem ser explicadas por diversos fatores, tais como padrão de condução dos motoristas, diferenças ambientais e na superfície do pavimento. Contudo, a diferença que possivelmente está mais relacionada aos resultados é a quantidade de faixas de rolamento. Enquanto a pesquisa citada avaliou pista dupla, este estudo focou em pista simples de mão dupla.

Na Figura 73 é mostrado um gráfico com os limites de conforto das acelerações transversais para as curvas C1, C2, C3, C4, C5 e C6. O gráfico mostra a média das acelerações transversais dos 15 condutores nas janelas de velocidade constante para os sentidos D e E.

Figura 73 - Limite de conforto da aceleração transversal em curvas de raio entre 100 e 500 m.



Fonte: Autor.

Como esperado, curvas de raios menores apresentaram limites de acelerações transversais superiores às demais. Para curvas entre 100-200 m, o limite do conforto foi de 0,22 g; curvas com raios entre 200-300 m, 0,17 g e raios entre 400-500 m, 0,08 g. Com relação a esses resultados, este estudo constatou que possivelmente os motoristas estão sujeitos a acelerações laterais superiores às curvas de pista simples no que se refere ao limiar do conforto.

Os resultados de Dhahir e Hassan (2018) mostraram a mesma tendência de aumento da aceleração transversal de acordo com a diminuição do raio. Contudo, os valores divergiram

parcialmente, a média da aceleração foi entre 0,20 e 0,15 g para raios entre 100-200 m, entre 0,10 e 0,15 g para raios entre 200-300 m e de 0,10 g para raios acima de 400 m.

Quanto aos sentidos, foi observado que o esquerdo apresenta limites de acelerações laterais mais altas do que o sentido direito em todas as curvas (com exceção da C4). A análise da matriz das acelerações transversais indica que, apesar das máximas acelerações no início da curva (Z3) estarem no sentido D, o sentido E apresentou acelerações superiores na tangente de entrada (Z2) e no centro da curva (Z4) na maioria dos casos. Esse resultado eleva o índice de acelerações transversais no sentido E.

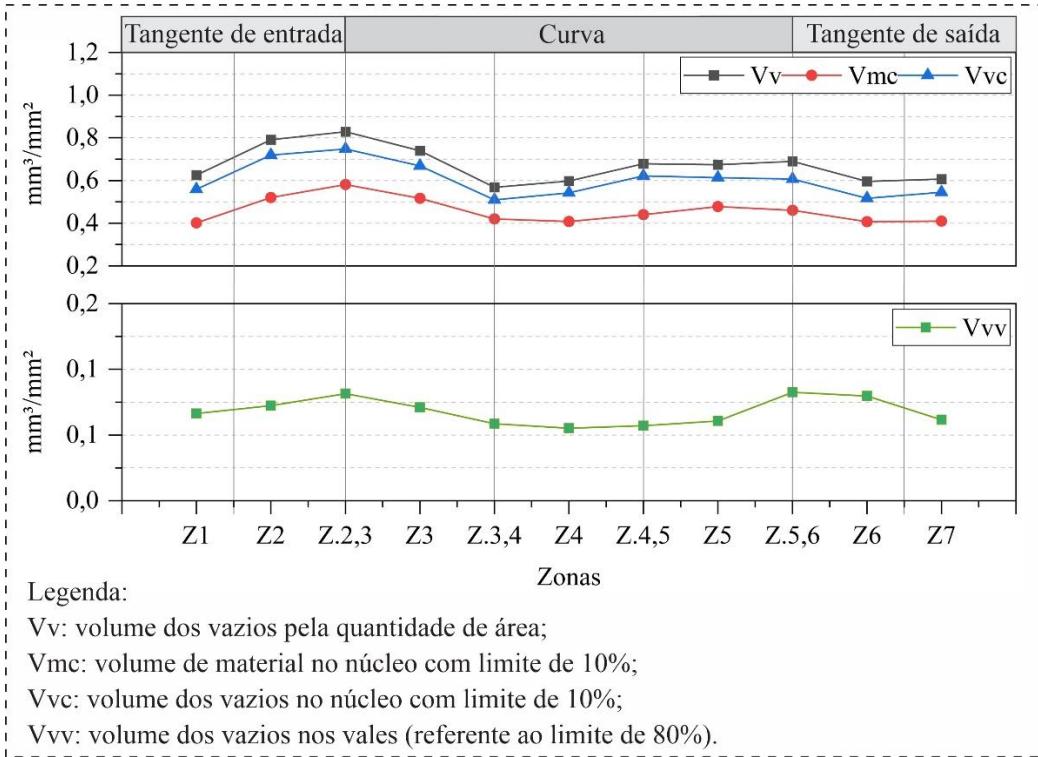
As análises desse estudo indicaram que o sentido E supera o sentido D em todos os parâmetros. Com exceção da C1 e C2 na zona 3, os índices de desaceleração mais altos foram observados nas curvas do sentido E (Figura 63). Com relação às acelerações transversais (Figura 66), o sentido E também apresentou índices mais altos comparados ao sentido D. Portanto, os resultados do limiar do conforto mais alto para o sentido E corroboram com todas as análises realizadas nesse estudo e sugerem que esse sentido pode apresentar maior risco de sinistros.

5.5. Impacto do Padrão de Condução na Superfície do Pavimento

As investigações desse estudo mostraram que há diferença no padrão de condução do motorista entre o sentido direito (D) e esquerdo (E) da via para a mesma curva. As análises indicam que os condutores estão sujeitos a maiores taxas de acelerações transversais no sentido E. Os dados também sugerem que as curvas com raios entre 100-200 m são as que exigem maiores taxas de desaceleração longitudinal e acelerações transversais.

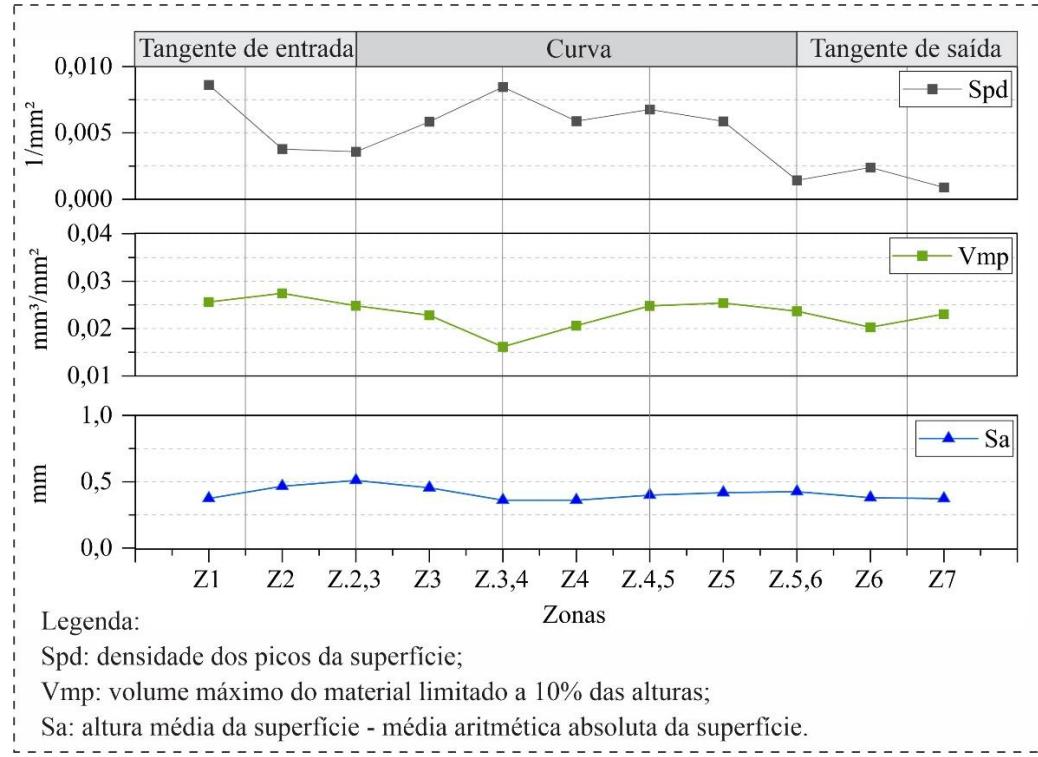
Com relação a definição da trilha de roda, a dinâmica do veículo realizando uma curva a esquerda tende a exercer maior pressão nos pneus do lado direito. Nesse sentido, o estudo da condição da superfície foi realizado na trilha de roda do pneu externo e direito do veículo, isto é, lado do acostamento do sentido E. Com base nesses resultados, optou-se por avaliar os parâmetros superficiais do pavimento para a curva com raio pequeno e maior quantidade de sinistros (C2). Na Figura 74 e Figura 75 são mostrados os parâmetros de macrotextura e microtextura do pavimento da curva C2.

Figura 74 - Parâmetros da macrotextura da superfície do pavimento da curva C2.



Fonte: Autor.

Figura 75 - Parâmetros da microtextura da superfície do pavimento da curva C2.

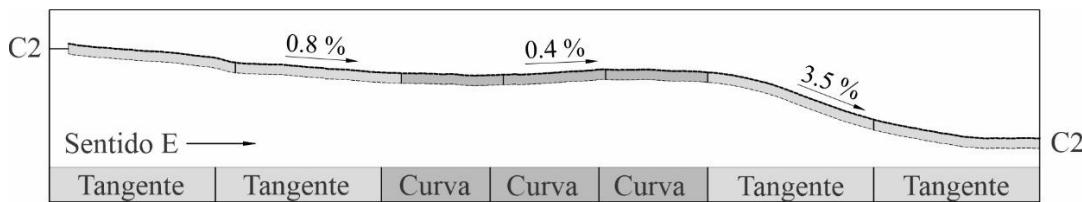


Fonte: Autor.

De modo geral, tanto os parâmetros da macrotextura quanto os da microtextura tendem a ter valores altos nas tangentes, diminuir na curva de forma decrescente da Z.2,3 até o

centro da curva (Z4), depois volta a aumentar até o fim da curva (Z.5,6). Nos parâmetros das tangentes de entrada e saída (Z1, Z6 e Z7), foram observadas algumas divergências. Os valores de atrito apresentados nessas zonas foram similares aos encontrados no centro da curva (Z4). Para tentar compreender esse comportamento, é importante avaliar a inclinação longitudinal da via para essa curva (Figura 76).

Figura 76 - Inclinação longitudinal da curva C2.



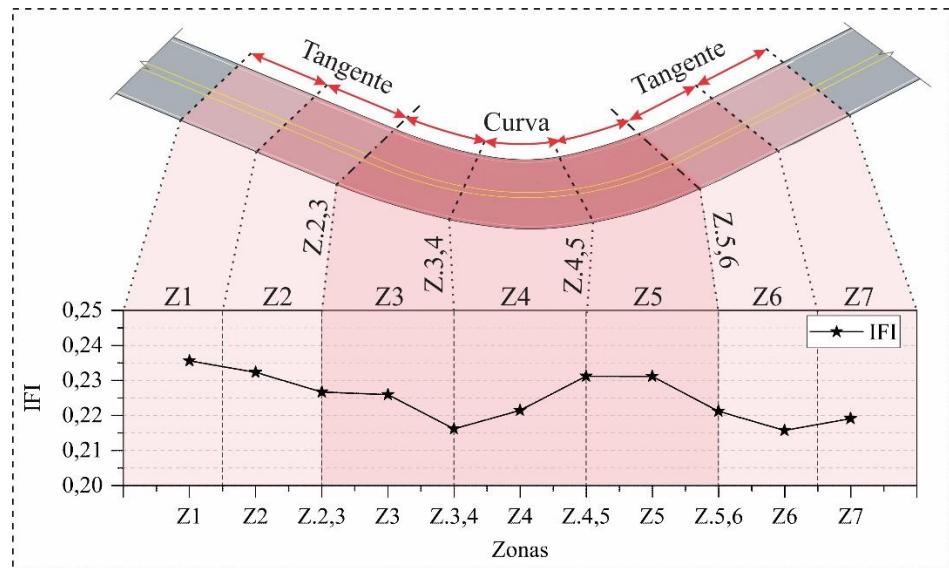
Fonte: Autor.

Na tangente de entrada (Z1), a inclinação é relativamente plana (-0,8%). Na tangente de saída (Z6), há um declive de 3,5%. Conforme a análise, aparentemente não há indícios de que a inclinação da tangente de entrada tenha influenciado a aceleração ou a desaceleração do condutor e refletido nos parâmetros da superfície nessa curva. Notou-se que na Z6, a inclinação pode ser uma explicação para a diminuição dos parâmetros da microtextura e macrotextura, pois as análises do coeficiente de angulação da velocidade mostraram que essa é uma zona de aceleração.

A macrotextura está associada aos volumes entre picos e vales do pavimento, visto que além de promover o contato do pneu-pavimento, ela é responsável pela drenagem superficial e pelo desenvolvimento do atrito em alta velocidade. Por sua vez, a microtextura está relacionada ao polimento dos agregados e, consequentemente, aos mecanismos de adesão entre pneu-pavimento. Além disso, ela promove o atrito a baixas velocidades (Wang *et al.*, 2018; Maia, 2020; Kumar e Gupta, 2021).

Os estudos de Kogbara *et al.* (2018) indicaram que a densidade dos picos e o volume máximo do material limitado a 10% da superfície são os parâmetros que mais explicam o atrito (R^2 entre 0,75 e 0,76). Este estudo avaliou o atrito com base nas equações propostas por esses autores e explicadas na seção 3.3.2. A definição do *IFI* (atrito da superfície) foi calculada com base na média do limite inferior e superior do método. Na Figura 77, é mostrado o atrito da superfície do pavimento na curva C2.

Figura 77 - Atrito da superfície do pavimento da curva C2.

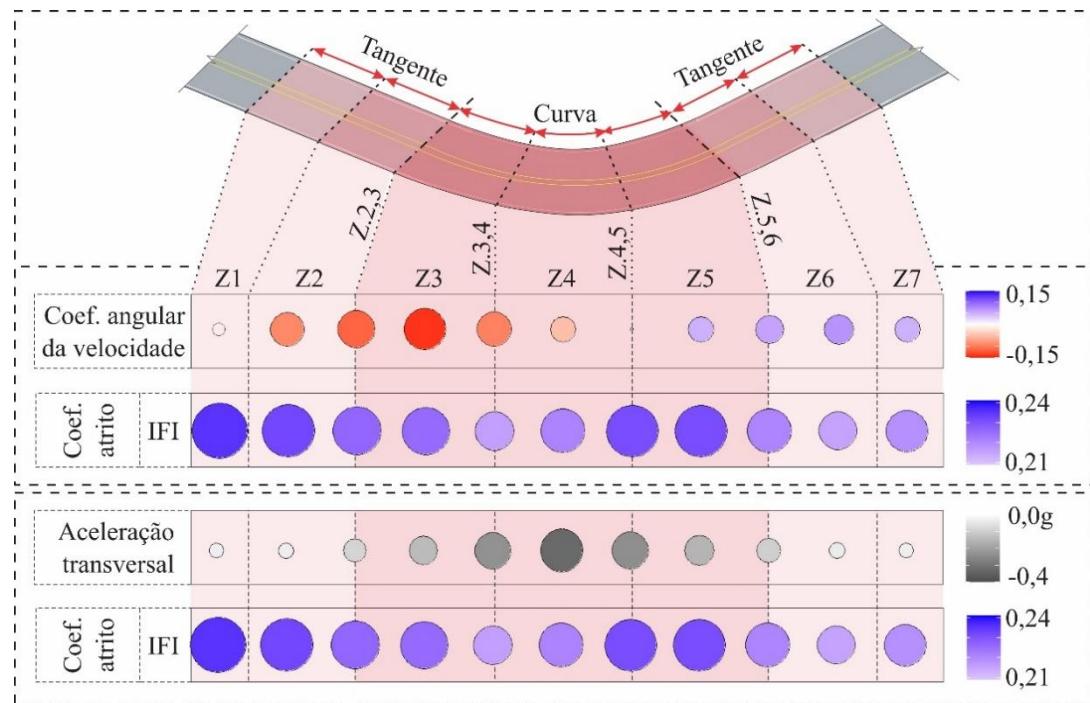


Fonte: Autor.

Nas zonas da tangente de entrada (Z1 a Z.2,3), a média do atrito é de 0,232. Na primeira parte da curva (Z.2,3 a Z4), desce para 0,223. Na segunda parte da curva (Z4 a Z.5,6), o atrito aumenta para 0,226 e volta e decrescer para 0,219 na tangente de saída (Z.5,6 a Z7). É importante observar que na primeira parte da curva o atrito diminuiu em comparação a tangente. O menor coeficiente de atrito foi identificado próximo ao centro da curva (igual a 0,216), já o maior, na tangente de entrada, sendo igual a 0,236. Nesse sentido, He *et al.* (2021) afirmam que os picos de tensões desenvolvidos são superiores às tensões desenvolvidas com o veículo estático para as mesmas condições durante a frenagem.

Os resultados do estudo de He *et al.* (2021) estão em concordância com os achados dessa pesquisa. Nos tópicos anteriores (5.1 a 5.3) foi comprovado que os condutores não seguem padrões semelhantes nas tangentes e no interior da curva. Dessa forma, o movimento de aceleração transversal e longitudinal pode afetar os parâmetros da superfície e refletir na diminuição do coeficiente de atrito nas curvas. Na Figura 78 são mostrados os coeficientes angulares da velocidade, acelerações transversais e coeficiente de atrito da curva C2.

Figura 78 - Coeficiente angular da aceleração, aceleração transversal e coeficiente de atrito da superfície da curva C2.



Fonte: Autor.

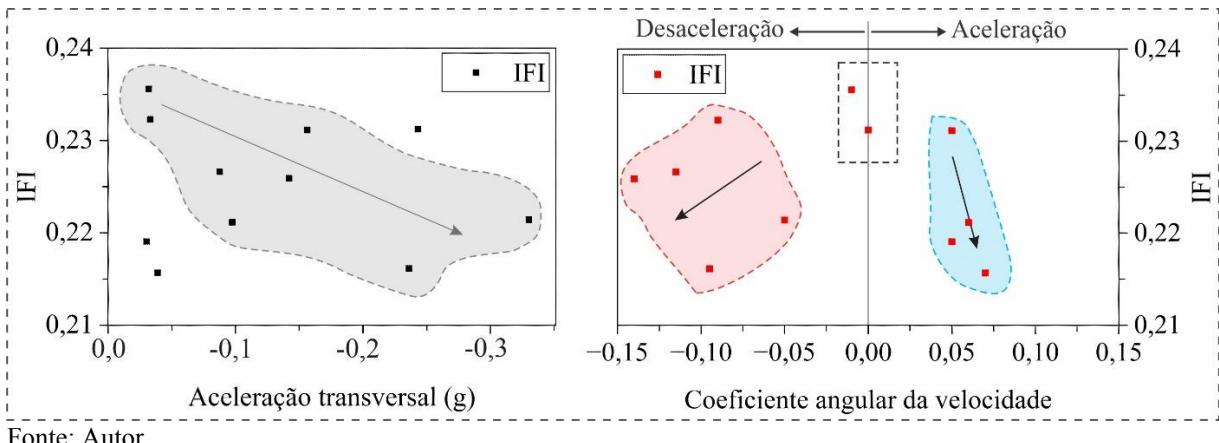
Com relação ao coeficiente angular, este estudo já observou que os condutores têm padrões diferentes na tangente e na curva. Nessa curva especificamente, os condutores desaceleraram na tangente de entrada até o centro da curva (Z2 a Z4), seguido de um movimento de aceleração do centro da curva a tangente de saída (Z4,5 a Z7). Na primeira parte da curva (desaceleração), o atrito é inferior à segunda parte (aceleração). Esses resultados podem indicar que a superfície do pavimento pode ser mais desgastada pela desaceleração do que pela aceleração, o que também foi sugerido por He *et al.* (2021).

Apesar disso, a diminuição do coeficiente de atrito não segue essa tendência em todas as zonas. Em termos comparativos, a intensidade da desaceleração e o coeficiente de atrito foram superiores na Z3 em relação à Z4. Isso significa que nessas zonas a desaceleração pode não ser a única explicação para o desgaste da superfície.

Por meio da avaliação da aceleração transversal, é observado que ela aumenta do início ao centro da curva (Z.2,3 a Z4) e atinge o seu máximo (-0,33). Posteriormente, diminui do centro até o fim da curva (Z4 a Z5,6). Esses dados podem sugerir que a aceleração transversal também pode influenciar no desgaste do pavimento e, consequentemente, na diminuição dos coeficientes de atrito nessas zonas. Na Figura 79 é mostrado um gráfico de

dispersão do coeficiente angular da velocidade, aceleração transversal e coeficiente de atrito da C2.

Figura 79 - Dispersão do coeficiente angular da velocidade, aceleração transversal e coeficiente de atrito da curva C2.



Fonte: Autor.

Apesar da coleta não envolver uma amostra suficientemente grande de pontos de coeficientes de atrito, este estudo identificou tendências importantes do coeficiente angular da velocidade e das acelerações transversais com relação ao coeficiente de atrito. No entanto, aponta-se para a necessidade de mais pesquisas com amostras maiores para análise desse parâmetro.

Com relação ao coeficiente angular da velocidade, foi verificado que coeficientes angulares próximos de zero indicam coeficientes de atrito maiores; nos trechos onde há aceleração ou desaceleração, os coeficientes são menores. Nas zonas de desaceleração (vermelho), a média do atrito é de 0,222; em aceleração (azul), é de 0,221. Em zonas constantes, a média do coeficiente de atrito é de 0,235. A aceleração transversal (cinza) também mostrou influência no coeficiente de atrito, pois à medida que a aceleração aumenta, o coeficiente de atrito diminui. Valores de atrito próximos de 0,236 foram identificados para a aceleração transversal de 0 g e 0,216 para acelerações de -0,24 g.

Na fase inicial do pavimento, a microtextura tende a aumentar o atrito devido ao tráfego inicial desgastar a película sobrejacente do ligante asfáltico, porém, com o tempo, o atrito tende a diminuir em consequência do polimento dos agregados ocasionado pela passagem dos veículos (Xie *et al.*, 2019). Os achados deste estudo indicam que além da passagem dos veículos, padrões de condução em curvas e tangentes também podem afetar a superfície do pavimento e alterar as propriedades superficiais. Como citado neste estudo, a consideração de

velocidade constante é frequentemente utilizada com parâmetros geométricos. Além disso, os valores de coeficientes de atrito adotados podem não representar a realidade, principalmente, em curvas, onde os índices de aceleração longitudinal e transversal são variados.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Considerações Finais

Este estudo foi dedicado a avaliar como os raios das curvas e inclinações longitudinais da via afetam o comportamento do motorista e alteram o padrão de condução veicular. Além disso, foi investigado como essa alteração na condução impacta nos parâmetros da superfície do pavimento, mais especificamente o atrito.

Questão a: de que maneira os raios de curvas horizontais, inclinações longitudinais e concordância de curvas podem influenciar a velocidade do condutor?

Com relação ao raio da curva, as velocidades impostas pelos motoristas aumentam à medida que o raio da curva cresce. Velocidades acima do limite da via (80 km/h) foram observadas nas tangentes, contudo, no interior das curvas os condutores reduzem abaixo do limite para raios entre 100-200 m. Esses resultados foram esperados e corroboram com os estudos conduzidos por outros autores. Os condutores podem ter reduzido a velocidade para se ajustarem ao traçado geométrico.

Independente do raio, as maiores variações de velocidade foram observadas em curvas com inclinações longitudinais acima de 3,5%. Apesar disso, foi identificado que as curvas onde ocorreram sinistros tinham inclinações inferiores a essa. Esses resultados sugerir que os motoristas apresentam padrões de condução com mais cautela para inclinações acima de 3,5%. As variações das velocidades possivelmente podem estar associadas ao ajuste e a direção defensiva dos condutores e esse fato pode refletir em menores índices de sinistros para essas curvas.

Curvas com inclinações longitudinais inferiores a 3,5% podem sugerir ao motorista maior conforto no traçado e isso reflete em velocidades mais altas nesses trechos, esses resultados apontam que possivelmente os sinistros avaliados nesse estudo podem ser reflexo, em partes, dessas características.

Questão b: os aspectos geométricos da via podem explicar alterações na trajetória, na velocidade e nas acelerações do condutor?

Os achados desse estudo constataram que as velocidades de desenvolvimento no interior das curvas não são constantes, o que vai de encontro com as considerações de

velocidade constante dos parâmetros de projeto geométrico de rodovias. Como esperado, as maiores intensidades de desaceleração longitudinal e aceleração transversal foram identificadas em curvas de raio entre 100-200 m. Esses resultados corroboram com a análise da velocidade, nessas curvas os condutores tendem a se ajustar com variações mais altas.

As análises mostraram que inclinações longitudinais inferiores 3,5% pode não explicar a intensidade de aceleração ou desaceleração. Para curvas de raio entre 100-200 m, as intensidades de desaceleração mais altas foram constatadas na curva com inclinação relativamente plana.

Este estudo propôs a análise do conforto do motorista em janelas de velocidades constantes. Com base nos resultados, foi identificado que, para raios menores, as acelerações transversais confortáveis são maiores (raios entre 100-200 m, por exemplo). Esses dados sugerem que apesar do ajuste de velocidade e direção defensiva, os condutores realizam trajetos de curvas de raios pequenos com intensidades de acelerações transversais superiores às curvas de raios maiores.

Questão c: O comportamento do condutor, influenciado pela geometria da via, afeta o coeficiente de atrito do pavimento?

Nesta pesquisa, as intensidades das acelerações longitudinais e transversais foram investigadas e comparadas com os parâmetros de atrito do pavimento. Como resultado, foi constatado que além da passagem dos veículos, os padrões de condução em curvas e tangentes podem afetar esses parâmetros.

Com relação às acelerações, a longitudinal tende a diminuir na tangente de entrada e primeira parte da curva. No centro da curva (Z4) foi observada uma transição e a desaceleração longitudinal é próxima de zero. A aceleração transversal tende a aumentar no decorrer da curva e atinge o seu máximo no centro (Z4).

Sobre os coeficientes de atrito, foi avaliado que eles têm valores mais baixos no interior da curva, em comparação com as tangentes. O seu valor mínimo é no centro da curva (Z4), esse resultado sugere que a aceleração transversal também pode ter uma contribuição importante no desgaste do pavimento e na diminuição do coeficiente de atrito disponível. Coeficientes de atrito médios foram observados na primeira zona da curva, onde a intensidade da desaceleração longitudinal é maior. Esse resultado corrobora com as indicações da literatura,

ações de frenagem e aceleração influenciam o desgaste do pavimento e esse fato é refletido em valores mais baixos de coeficientes de atrito.

6.2. Recomendações para Trabalhos Futuros

Como sugestão de investigações futuras, esta pesquisa sugere os seguintes pontos:

- Realizar coletas do padrão de condução com mais motoristas e gerar um número maior de observações com informações de velocidades, acelerações longitudinais e transversais e geolocalização. O objetivo dessa investigação é observar se há relação entre os comportamentos dos motoristas para as mesmas curvas.
- Investigar mais curvas com raios distintos com o objetivo de compreender como o condutor se comporta frente a outros parâmetros geométricos;
- Avaliar a influência da superelevação da curva, especialmente na aceleração transversal do motorista;
- Avaliar o coeficiente de atrito em outras curvas com geometrias distintas. Além disso, os achados dessa pesquisa indicaram que a condução no sentido direito e esquerdo são diferentes, por isso, a análise do atrito também deve incorporar os dois sentidos da via e trilhas de roda interna e externa. Essa avaliação vai fornecer informações importantes com relação ao atrito ao longo da curva e indicar pontos possivelmente críticos;
- Analisar a possibilidade de incluir estudos com dados naturalistas em campo. A investigação com base nessa premissa pode oferecer dados mais precisos sobre o comportamento do motorista.

REFERÊNCIAS

AARTS, L.; SCHAGEN, I. VAN. Driving speed and the risk of road crashes: A review. **Accident Analysis & Prevention**, v. 38, n. 2, p. 215–224, 2006. DOI: 10.1016/j.aap.2005.07.004

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **ANTT - Informações Gerais**. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/informacoes-gerais>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

ALMEIDA, R.; VASCONCELOS, L.; BASTOS SILVA, A. Design Consistency Index for Two-lane Roads based on Continuous Speed Profiles. **PROMET - Traffic&Transportation**, 30(2), 231–239, 2018. DOI: 10.7307/ptt.v30i2.2573.

ALRAJHI, A.; ROY, K.; QINGGE, L.; KRIBS, J. Detection of Road Condition Defects Using Multiple Sensors and IoT Technology: A Review IEEE. **Open Journal of Intelligent Transportation System**. v. 4, p. 372–392, 2023. DOI: 10.1109/OJITS.2023.3237480.

ALVES, C. M.; SOUZA, F. C S. **Mina Brejui: memória e trabalho em Currais Novos - RN**. Revista LABOR, Fortaleza, v. 1, n. 24, p. 356-368, 2020.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **A policy on geometric design of highways and streets**. Washington DC, 1994.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **A policy on geometric design of highways and streets**. 6th ed., Washington DC, 2011.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **A policy on geometric design of highways and streets**. 7th ed., Washington DC, 2018.

ANDRIEJAUSKAS, T.; VOROBOVVAS, V.; MIELONAS, V. **Evaluation of skid resistance characteristics and measurement methods**. 9th ed. International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2014. **Anais**. Dept. of Mathematical Modelling, 2014. DOI: 10.3846/enviro.2014.141.

ANTAS, P. M.; VIEIRA, A.; GONÇALO, E. A.; LOPES, L. A. S. **Projeto Geométrico e de Terraplenagem**. Interciência ed. Rio de Janeiro, 2010. 282 p.

APS, M. **Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI - Índice Internacional de Atrito para Revestimentos Asfálticos**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ARMAN, M. A.; TAMPÈRE, C. M. J. Lane-level trajectory reconstruction based on data-fusion. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 145, p. 103906, 2022. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103906.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD AND TRANSPORT AGENCIES. **Guide to Road Design Part 3: Geometric Design**. Sydney, 2021.

Bella, F. Effects of Combined Curves on Driver's Speed Behavior: Driving Simulator Study. **Transportation Research Procedia**, v. 3, p. 100–108, 2014. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.10.095

BOBERMIN, M.; FERREIRA, S. A novel approach to set driving simulator experiments based on traffic crash data. **Accident Analysis & Prevention**, v. 150, p. 105938, 2021. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105938.

BRASIL. Instrução Normativa 19, de março de 2023. Dispõe sobre a inspeção, por Organismo de Inspeção Acreditado, de projetos, orçamentos e obras de engenharia no âmbito dos Contratos de Concessão de Rodovias e Ferrovias Federais. Disponível em: <https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&link=S&tipo=INM&numeroAto=00000019&seqAto=000&valorAno=2023&orgao=DG/ANTT/MT&cod_modulo=422&cod_menu=7139>. Acesso em: 8 jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Justiça e Segurança Pública – Polícia Rodoviária Federal. Disponível em: <<https://www.gov.br/prf/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-sinistros>> Acesso em: 10 de set. de 2023.

BUDDHAVARAPU, P.; BANERJEE, A.; PROZZI, J. A. Influence of pavement condition on horizontal curve safety. **Accident Analysis & Prevention**, v. 52, p. 9–18, 2013. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.010.

CAFISO, S.; MONTELLA, A.; D'AGOSTINO, C.; MAURIELLO, F.; GALANTE, F. Crash modification functions for pavement surface condition and geometric design indicators. **Accident Analysis & Prevention**, v. 149, p. 105887, 2020. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105887.

CANADIAN ROADS. Geometric Design Guide (GDG). ONTARIO, 2023.

CHEN, J.; HUANG, X.; ZHENG, B.; ZHAO, R.; LIU, X.; CAO, Q.; ZHU, S. Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 910–919, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.321.

CHEN, T.; ZHAO, L.; ZHANG, A.; GONG, B. **Study on Friction Characteristics of Wet Road Surface in Road Traffic Accident Analysis.** CICTP 2020. Anais. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. DOI: 10.1061/9780784482933.367.

CHEN, Y.; QUDDUS, M.; WANG, X. Impact of combined alignments on lane departure: A simulator study for mountainous freeways. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 86, p. 346–359, 2018. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.010.

CHOUDHARI, T.; MAJI, A. Socio-demographic and experience factors affecting drivers' runoff risk along horizontal curves of two-lane rural highway. **Journal of Safety Research**, v. 71, p. 1–11, 2019. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.09.013.

CHU, D.; LI, Z.; WANG, J.; WU, C.; HU, Z. Rollover speed prediction on curves for heavy vehicles using mobile smartphone. **Measurement**, v. 130, p. 404–411, dez. 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.07.054.

CONFERENCE OF EUROPEAN DIRECTORS OF ROADS. Forgiving Roadsides Design Guide. 2012.

Corben, B.; Peiris, S.; Mishra, S. The Importance of Adopting a Safe System Approach—Translation of Principles into Practical Solutions. **Sustainability**, v. 14, n. 5, 2022, DOI: 10.3390/su14052559.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. Painel CNT de Consultas Dinâmicas dos Sinistros Rodoviários. 2022.

COSTA, G. H. R.; BALDO, F. Generation of road maps from trajectories collected with smartphone – A method based on Genetic Algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 37, p. 799–808, 2015. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.07.017.

CUMMING, M. M.; BETTINI, E.; CHOW, J. C. High-Quality Systematic Literature Reviews in Special Education: Promoting Coherence, Contextualization, Generativity, and Transparency. **Exceptional Children**, v. 89, n. 4, p. 412–431, 2023. DOI: 10.1177/00144029221146576.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. Nota Técnica de Projeto Geométrico - Instrução de Projeto - IT-DE-F00/001. São Paulo. 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Institucional - DER-SP. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Institucional/Institucional.aspx>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO DISTRITO FEDERAL. Quem somos - DER-DF. Disponível em: <<https://www.der.df.gov.br/quem-somos/>>. Acesso em: 28 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais - 706/20. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manuais Vigentes. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Dados abertos. Disponível em: <<https://dados.gov.br/dados/organizacoes/visualizar/departamento-nacional-de-infraestrutura-de-transportes-dnit>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

DESCORNET, G.; SCHMIDT, B.; BOULET, M.; SCHMIDT, B. B. M.; DO, M. T.; FAFIE, J.; ALONSO, M.; ROE, P.; Viner, H. HERMES. Project (Harmonization of European Routine and research Measuring Equipment for Skid Resistance). **Transportation Research Board - TRB**, 2006.

DHAHIR, B.; HASSAN, Y. Framework for Reliability-Based, Safety-Explicit Horizontal Curve Design using Naturalistic Driving Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2673, n. 4, p. 605–615, 2019a. DOI: 10.1177/0361198119838853.

DHAHIR, B.; HASSAN, Y. Studying Driving Behavior on Horizontal Curves using Naturalistic Driving Study Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2672, n. 17, p. 83–95, 2018. DOI: 10.1177/0361198118784384.

DHAHIR, B.; HASSAN, Y. Modeling Speed and Comfort Threshold on Horizontal Curves of Rural Two-Lane Highways Using Naturalistic Driving Data. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 145, n. 6, 2019b. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000246.

DUNFORD, A. **Friction and the texture of aggregate particles used in the road surface course**. Tese de Doutorado, Universidade de Nottingham, Nottingham - Reino Unido, 2013.

ESTRADAS. **PRF morre em colisão na BR-427, em Currais Novos, no RN**. Disponível em: <<https://estradas.com.br/prf-morre-em-colisao-na-br-427-em-currais-novos-no-rn/>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Geometric Design Practices for European Roads**. Washington DC, 2001.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways**. Publication 99-171, Washington DC, 2000.

FIGUEIRA, Fernando M. M. **Estudo e Concepção de Estradas**. Livraria Almedina. Coimbra, Portugal, 1984.

FLINTSCH, G. W.; MCGHEE, K. K.; IZEPPI, E. DE L.; NAJAFI, S. **The Little Book of Tire Pavement Friction**, 2012. Disponível em: <https://www.apps.vtti.vt.edu/1-pagers/CSTI_Flintsch/The%20Little%20Book%20of%20Tire%20Pavement%20Friction.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2024.

GOVERNMENT OF ABU DHABI. **Road Geometric Design Manual**. 2 ed. United Arab Emirates, 2021.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. **Governo do RN conclui a reconstrução da RN-118**. 2020. Disponível em: <<https://www.governocidadao.rn.gov.br/?pag=78&pg=noticias&id=1649>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

HARTLEY, R. I.; STURM, P. Triangulation. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 68, n. 2, p. 146–157, 1997. DOI: 10.1006/cviu.1997.0547.

HASSAN, Y.; EASA, S. M. Effect of Vertical Alignment on Driver Perception of Horizontal Curves. **Journal of Transportation Engineering**, v. 129, n. 4, p. 399–407, 2003. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:4(399).

HE, H.; LI, R.; YANG, Q.; PEI, J.; GUO, F. Analysis of the Tire-Pavement Contact Stress Characteristics during Vehicle Maneuvering. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 25, n. 7, p. 2451–2463, 12 jul. 2021. DOI: 10.1007/s12205-021-1306-0.

INTERNATIONAL ROAD ASSESSMENT PROGRAMME. **BrasilRAP DNIT entrega 54.500 km de estradas codificadas por Irap**, 2023. Disponível em: <<https://irap.org/pt/2023/02/brazilrap-dnit-delivers-54500km-of-roads-coded-by-irap/>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

INTERNATIONAL ROAD ASSESSMENT PROGRAMME. **Star Rating Demonstrator**. Disponível em: <<https://demonstrator.vida.irap.org/>>. Acesso em: 8 jan. 2024a.

INTERNATIONAL ROAD ASSESSMENT PROGRAMME. **Classificação por Estrela.**

Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYzA2MzFjMTgtZmQzZC00MjBmLTg2ODAtZDRjMGZiZWM2NWUwIiwidCI6ImQ5MjBiYTg4LWYxOTktNDIwZS1hYzVhLTQzOGI2ZTkyMzQ5NSJ9>>. Acesso em: 8 jan. 2024b.

INTERNATIONAL ROAD ASSESSMENT PROGRAMME. **iRAP Methodology fact sheets.** Disponível em: < <https://irap.org/methodology/>>. Acesso em: 28 jan. 2024c.

JACOB, A.; DHANYA, R.; ANJANEYULU, M. V. L. R. Geometric Design Consistency of Multiple Horizontal Curves on Two-lane Rural Highways. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 1068–1077, 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.202.

JI, X.; WU, Y.; HAO, J.; FANG, R.; HU, C. Severity Factors Analysis Model of Traffic Accident on Combined Horizontal and Vertical Alignments. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 20(6), p. 197–204, 2020.

JUNG, S.; WANG, K.; OH, C.; CHANG, J. Development of Highway Safety Policies by Discriminating Freeway Curve Alignment Features. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 1418–1426, 2018. DOI: 10.1007/s12205-017-1859-0.

KANWAL, S.; MURAM, F. U.; JAVED, M. A. Systematic review on contract-based safety assurance and guidance for future research. **Journal of Systems Architecture**, v. 146, p. 103036, 2024. DOI: 10.1016/j.sysarc.2023.103036.

KOGBARA, R. B.; MASAD, E. A.; KASSEM, E.; SCARPAS, A. (TOM); ANUPAM, K. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 602–617, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.

KOGBARA, R. B.; MASAD, E. A.; WOODWARD, D; MILLAR, P. Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 227–240, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102.

KASSEM, E.; SCARPAS, A. (TOM); ANUPAM, K. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 602–617, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.

KORDANI, A. A.; MOLAN, A. M. The effect of combined horizontal curve and longitudinal grade on side friction factors. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 1, p. 303–310, 2015. DOI: 10.1007/s12205-013-0453-3.

KUMAR, A.; GUPTA, A. Review of Factors Controlling Skid Resistance at Tire-Pavement Interface. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1–16, 2021. DOI: 10.1155/2021/2733054.

LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M.; HAYWARD, J. C.; PALURI, A. Possible Design Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane Rural Roads. **Transportation Research Record**. P. 111-122, 1988.

LAMM, R.; PSARIANOS, B.; MAILAENDER, T.; CHOUEIRI, E. M.; HEGER, R.; STEYER, R. **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**. McGraw-Hill ed., New York, 1999.

LIMA, I. M. DE O.; FIGUEIREDO, J. C.; MORITA, P. A.; GOLD, P. **Fatores condicionantes da gravidade dos sinistros de trânsito nas rodovias brasileiras**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, Brasília, 2008.

LLOPIS-CASTELLÓ, D.; FINDLEY, D. J.; CAMACHO-TORREGROSA, F. J.; GARCÍA, A. Calibration of inertial consistency models on North Carolina two-lane rural roads. **Accident Analysis and Prevention**, v. 127, p. 236–245, 2019. DOI: 10.1016/j.aap.2019.03.013.

MADGWICK, S.; VAIDYANATHAN, R.; HARRISON, A. **An Efficient Orientation Filter for Inertial Measurement Units (IMUs) and Magnetic Angular Rate and Gravity (MARG) Sensor Arrays**. University of Bristol, Reino Unido, 2010.

MAIA, R. S. **Contributions to the tire-pavement friction characterization from the traffic safety perspective**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

MAZZEI, M.; LELLIS, A. M. DI. **Capacitive accelerometers at low frequency for infrastructure monitoring**. Procedia Structural Integrity. Anais. Elsevier B.V., 2022. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.156.

MONTELLA, A.; IMBRIANI, L. L. Safety performance functions incorporating design consistency variables. **Accident Analysis & Prevention**, v. 74, p. 133–144, 2015. DOI: 10.1016/j.aap.2014.10.019.

NASIRI, A. S. A.; RAHMANI, O.; KORDANI, A. A.; KARBALLAEZADEH, N.; MOSAVI, A. Evaluation of safety in horizontal curves of roads using a multi-body dynamic simulation process. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 16, p. 1–20, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17165975.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA. **Brasil tem aumento de mortes no trânsito em 2021**, 2023. Disponível em: <<https://www.onsv.org.br/comunicacao/brasil-tem-aumento-de-mortes-no-transito-em-2021>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

OUNAHDOU, Y.; WALLACE, E.-R.; REYNAUD, P.; PICOUX, B.; DOPEUX, J.; PETIT, C.; NÉLIAS, D. Effect of the tire – Pavement contact at the surface layer when the tire is tilted in bend. **Construction and Building Materials**, v. 305, p. 124765, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124765.

PAIXÃO, M. J. S. **Determinação da irregularidade superficial do pavimento por meio dos dados de sensores de aceleração vertical obtidos por medição descentralizada**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

PEREIRA, A.; SOUZA, T. J.; FERREIRA, W. L. G. CASTELO BRANCO, V. T. F. **Análise preliminar da relação entre sinistros de trânsito e raios de curvas: estudo de caso em um trecho da BR-427 no Rio Grande do Norte.** In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2023, Santos. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2023. Disponível em: <<https://proceedings.science/anpet-2023/trabalhos/analise-preliminar-da-relacao-entre-sinistros-de-transito-e-raios-de-curvas-estu?lang=pt-br>>. Acesso em: 03 fev. 2024.

ROADS & HIGHWAYS DEPARTMENT. **Geometric Design Standards.** Bangladesh, 2000.

RONDORA, M. E. S.; PIRDAVANI, A.; LAROCCA, A. P. C. Driver Behavioral Classification on Curves Based on the Relationship between Speed, Trajectories, and Eye Movements: A Driving Simulator Study. **Sustainability**, v. 14, n. 10, p. 6241, 2022. DOI: 10.3390/su14106241.

SANTOS, M. I.; OLIVEIRA, P. T. M. S.; LAROCCA, A. P. C. Investigation the Influence of Risk Factors on the Occurrence of Road Accidents Using the Driver Performance Model. **Transportation in Developing Economies**, v. 8, n. 1, p. 10, 2022. DOI: 10.1007/s40890-021-00148-x.

SEEL, T.; RUPPIN, S. **Eliminating the Effect of Magnetic Disturbances on the Inclination Estimates of Inertial Sensors,** IFAC - PapersOnLine. **Anais.** Elsevier B.V., 2017. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1534.

SLEBODNIK, M.; PARDON, K.; HERMER, J. Who's Publishing Systematic Reviews? An Examination Beyond the Health Sciences. **Issues in Science and Technology Librarianship**, n. 101, 2022. DOI: 10.29173/istl2671.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY LIMITED. **Geometric Design Guidelines.** África do Sul, 2003.

TANISHITA, M.; WEE, B. VAN. Impact of vehicle speeds and changes in mean speeds on per vehicle-kilometer traffic accident rates in Japan. **IATSS Research**, v. 41, n. 3, p. 107–112, 2017. DOI: 10.1016/j.iatssr.2016.09.003.

UMAN, L. S. Systematic reviews and meta-analyses. **Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry**, v. 20, n. 1, p. 57–9, 2011. PMID: 21286370.

UUS, A.; MIAH, S.; ROBERTS DIRECTOR, S.; TWIST GEOPHYSICIST, S.; HOVENS, M.; NARDONI, G. **NDT Sensor Fusion: Optimisation of NDT Sensor Data Processing Strategies for Road Infrastructure Inspection.** 2016.

USGS. **EarthExplorer - USGS.** Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em: 10 de abr. de 2024.

VAYALAMKUZHI, P.; AMIRTHALINGAM, V. Influence of geometric design characteristics on safety under heterogeneous traffic flow. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 3, n. 6, p. 559–570, 2016. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.05.006.

WANG, D.; ZHANG, Z.; KOLLMANN, J.; OESER, M. Development of aggregate micro-texture during polishing and correlation with skid resistance. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 5, p. 629–641, 2018. DOI: 10.1080/10298436.2018.1502436.

WANG, X.; YAO, J.; DING, Z. Highway Safety Analysis on the Influence of Continuous Degradation of Three-dimensional Alignment. **China Journal of Highway and Transport**, v. 34(1), p. 157–166, 2021. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.014.

WANG, X.; WANG, X. Speed change behavior on combined horizontal and vertical curves: driving simulator-based analysis. **Accident Analysis & Prevention**, v. 119, p. 215–224, 2018. DOI: 10.1016/j.aap.2018.07.019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2021-2030**. Geneva, 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global status report on road safety 2023**. Geneva, 2023.

WU, C.; WANG, Z.; HU, S.; LEPINE, J.; NA, X.; AINALIS, D.; STETTLER, M. **Automated Machine-Learning Approach for Road Pothole Detection Using Smartphone Sensor Data**. **Sensors**, v. 20, n. 19, p. 5564, 2020. DOI: 10.3390/s20195564.

XIE, X.; WANG, C.; WANG, D.; FAN, Q.; OESER, M. Evaluation of Polishing Behavior of Fine Aggregates Using an Accelerated Polishing Machine with Real Tires. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 145, n. 2, p. 04019015, 2019. DOI: 10.1061/JPEODX.0000116.

Xu, S.; Liu, Q.; Bo, Y.; Chen, Z.; Wang, C. Estimating the International Roughness Index of asphalt concrete pavement by response-based testing equipment and intelligent algorithms. **Construction and Building Materials**, v. 433, 2024, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136659.

ZHANG, Y.; MA, Z.; SONG, X.; WU, J.; LIU, S.; CHEN, X.; GUO, X. Road Surface Defects Detection Based on IMU Sensor. **IEEE Sensors Journal**, v. 22, n. 3, p. 2711–2721, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3135388.