



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

CRESO DE FRANCO PEIXOTO

**A CORRELAÇÃO ENTRE SEGURANÇA VEICULAR E GEOMETRIA
RODOVIÁRIA COM BASE NA ACELERAÇÃO CENTRÍPETA**

CAMPINAS
2024

CRESO DE FRANCO PEIXOTO

**A CORRELAÇÃO ENTRE SEGURANÇA VEICULAR E GEOMETRIA
RODOVIÁRIA COM BASE NA ACELERAÇÃO CENTRÍPETA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP em 9 de agosto de 2024 como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na Área de Transportes

Orientador: Prof. Dr. DIÓGENES CORTIJO COSTA

Coorientador: Prof. Dr. CÁSSIO EDUARDO LIMA DE PAIVA

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA POR CRESO DE
FRANCO PEIXOTO, TENDO COMO ORIENTADOR
DIÓGENES CORTIJO COSTA**

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P359c Peixoto, Creso de Franco, 1957-
A correlação entre segurança veicular e geometria rodoviária com base na aceleração centrípeta / Creso de Franco Peixoto. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Diógenes Cortijo Costa.
Coorientador: Cássio Eduardo Lima de Paiva.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Acidentes de trânsito. 2. Geometria. 3. Transporte rodoviário. I. Costa, Diógenes Cortijo, 1951-. II. Paiva, Cássio Eduardo Lima de, 1953-. III. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: The correlation between vehicle safety and road geometry based on centripetal acceleration

Palavras-chave em inglês:

Traffic accidents

Geometry

Highway transportation

Área de concentração: Transportes

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Diógenes Cortijo Costa [Orientador]

Henrique Cândido de Oliveira

Paulo César Segantine

Marcelo Monari

Fernando Augusto Battistini Pestana

Data de defesa: 09-08-2024

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-2746-0360>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6395492113586231>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

**A CORRELAÇÃO ENTRE SEGURANÇA VEICULAR E GEOMETRIA
RODOVIÁRIA COM BASE NA ACELERAÇÃO CENTRÍPETA**

Autor: **Creso de Franco Peixoto**

Orientador: Prof. Dr. Diógenes Cortijo Costa

Coorientador: Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Diógenes Cortijo Costa
Presidente e Orientador – FECFAU/UNICAMP

Prof. Dr. Henrique Cândido de Oliveira
FECFAU/UNICAMP

Prof. Dr. Paulo César Segantine
EESC/USP

Prof. Dr. Marcelo Monari
UFSCar

Prof. Dr. Fernando Augusto Battistini Pestana
RHFER

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 9 de agosto de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada e dedicada esposa, Giselda Aparecida Bellan Peixoto; à nossa filha, orgulho dos pais, Larima Bellan Peixoto; à avó paterna e *mãe com açúcar*, Hilda Lourdes Dias Peixoto (*in memoriam*); ao irmão de meu pai, quem forjou minha vida profissional, Thales de Lorena Peixoto Junior (*in memoriam*), à maravilhosa avó de minha esposa, Otília de Almeida Rosa (*in memoriam*); aos meus pais, Creso Dias Peixoto e Maria Aparecida de Franco Peixoto (*in memoriam*), e aos meus sogros, Iracema de Almeida Rosa Bellan e a Narciso Bellan (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Diógenes Cortijo Costa, meu orientador, pelo incentivo sempre presente, à cuidadosa leitura e, em especial, ao acolhimento em momentos sensíveis para a devida continuidade junto ao programa.

Agradeço à Prof. Dra. Maria Teresa Françoso, pelo incentivo, sugestões e empenho para que eu não desanimasse e para que buscasse sempre novas abordagens, em paralelo às sugestões ao longo do meu programa de pesquisa, durante vários anos.

Agradeço ao meu primeiro orientador, Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva, por todos os anos que me orientou em diversas linhas de pesquisa e trabalhos publicados, antes de meu acesso ao programa de doutoramento; ao incentivo para que estabelecesse uma linha para o programa de Doutorado, bem como às sugestões na elaboração do trabalho que resultou na qualificação. Em particular, à denominação “Cabo de Guarda Chuva” ao primeiro modelo da linha de pesquisa. Seu incentivo à publicação e apresentação em plenários ultramarinos gerou-me excepcional experiência e conhecimento.

Agradeço aos docentes do Departamento de Infraestrutura e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, bem como a docentes da UFSCar e da EESC-USP, que muito me apoiaram, com sugestões, dicas e amparo ao longo da trajetória deste trabalho de longa duração.

Agradeço o apoio do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, na pessoa do Sr. Cel. Sergio Henrique Codelo Nascimento, DD. Superintendente do DER/SP, na cessão de bancos de dados de sinistros, bem como de desenhos e projetos de trechos rodoviários, dentre outras informações que foram fundamentais na análise do Modelo desenvolvido. Agradeço também ao Sr. Gean Franco, Assessor do DER/SP, pelo empenho no encaminhamento e procedimentos necessários para a efetivação do aporte das informações.

EPÍGRAFE

Aquele que entende e apoia minorias sociais pressente o crepúsculo matinal sobre as trevas autocráticas. Amá-los e elevá-los à abordagem transcendental afasta preconceitos e leva a visão retrógrada para o único lugar em que deve permanecer: nas páginas de livros.

Do autor

RESUMO

Acidentes rodoviários participam, de forma significativa, na perda de vidas humanas e recursos financeiros, tanto em termos mundiais como nacionais. Para se conceber novas estratégias de combate ao problema, há contínua necessidade de se buscar novas abordagens. Neste trabalho, elementos geométricos rodoviários e dados de acidentes ocorridos ao longo de pelo menos 10 anos foram analisados e correlacionados, tanto de forma isolada quanto conjunta. Utiliza-se a aceleração centrípeta como o principal parâmetro para correlações indiretas com os acidentes, fundamentadas em características geométricas significativas. Propõe-se um modelo que correlaciona elementos geométricos a acidentes, adequado tanto para aplicações pontuais quanto para segmentos rodoviários, sendo particularmente aplicável em rodovias de pista única, sobretudo em longos trechos em declive. A aplicabilidade do modelo é demonstrada em segmentos rodoviários do sudeste brasileiro, com dados geométricos obtidos através de levantamentos de campo e de fontes abertas na internet. A precisão desses dados abertos foi verificada mediante comparação com desenhos físicos das estradas examinadas, correspondendo ao período do levantamento de acidentes. O modelo proposto visa contribuir para o entendimento da trajetória veicular que o predispõe a acidentes em função dos elementos geométricos que mais influenciam nesses eventos, por meio de uma análise integrada dessas variáveis, eliminando a necessidade de se aguardar pela acumulação de dados sobre acidentes. A correlação entre tombamentos e índice de risco de abordagem científica atingiu coeficiente de determinação superior a 0,8 no trecho de teste do Modelo Arco-Íris. As melhores correlações entre os índices de risco propostos e outros tipos de acidentes e veículos apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,6; parâmetro utilizado para avaliar a qualidade dos modelos resultantes, obtidos nos dois trechos rodoviários estudados, condicionados por traçados sinuosos e longa extensão em descida.

Palavras-Chave: Geometria rodoviária, Acidentes viários, Aceleração centrípeta.

ABSTRACT

Road accidents play a significant role in the loss of human lives and financial resources, both globally and nationally. To devise new strategies to minimize the problem, there is a continuous need to seek new approaches. In this work, road geometric elements and accident data that occurred over at least 10 years were analyzed and correlated to some road parts, both individually and jointly. Centripetal acceleration is used as the main parameter for an indirect correlation to accidents, based on significant geometric characteristics. A model is proposed that correlates geometric elements to accident rates, suitable for applications to single lane highway segments, especially on long downhill stretches. The applicability of the model is demonstrated on road parts from Southeast Brazil, with geometric data obtained through field surveys and from open data on internet. The accuracy of these open access data was verified by comparison with as built drawings of the examined highways, matching the accident collection. The proposed model aims to contribute to the understanding of the vehicle trajectory that predisposes accidents related to the adopted main geometric features. The correlation between the number of rollovers and the scientific risk index reached a determination coefficient higher than 0.8; in the Rainbow Model road test section. The best correlations between the proposed risk indexes and other types of accidents and vehicles presented determination coefficients higher than 0.6; a parameter used to evaluate the quality of the resulting Model, obtained on the two selected road sections, conditioned by sinuous routes and long downhill stretches.

Keywords: Road geometry. Road accidents. Centripetal acceleration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mortes no Trânsito Brasileiro	21
Figura 2 – Relação entre Mortalidade Rodoviária e Violência Pública em UFs.....	22
Figura 3 – Frequência de Acidentes em Rodovias Federais Em Função de Causas Distintas.....	23
Figura 4 – Mortos no Trânsito Brasileiro – período 1997 a 2021	31
Figura 5 – Influência da Rotação em Função do Tempo de Exposição em Humanos	33
Figura 6 – Valores de Coeficiente de Atrito Lateral em Função da Velocidade	39
Figura 7 – Coeficiente de Atrito Longitudinal em Função da Velocidade	42
Figura 8 – Campo visível em curva horizontal.....	43
Figura 9 – Trecho da BR 381 Duplicada em Mesma Geometria da Pista Original....	48
Figura 10 – Métodos de Seleção da Superelevação em Função da Curvatura	52
Figura 11 – Influência da Largura do Pavimento no Risco Rodoviário.....	59
Figura 12 – Acidentes por Milhão de Veículos-Quilômetro em Função do Raio Horizontal	60
Figura 13 – Taxa de Acidentes (AR) em Função da Taxa de Alteração de Curvatura	62
Figura 14 – Taxa de Acidentes (AR) em Função da Distância de Visibilidade.....	63
Figura 15 – Taxa de Acidentes (AR) em Função do Raio de Curvatura	64
Figura 16 – Taxa de Acidentes (AR) em Função da declividade.....	64
Figura 17 – Porcentagens de Acidentes com Vítimas.....	67
Figura 18 – Taxa de Acidentes (AR) em Função dos Raios de Curvatura.....	67
Figura 19 – Fluxograma do Desenvolvimento de Uma Regressão entre IRV e Acidentes.....	77
Figura 20 – Trecho de Descida de Serra da SP 98 – Para Teste dos Modelos	79
Figura 21 – Trecho de Descida de Serra da BR116 – Para Validação dos Modelos	80
Figura 22 – Seleção de Trecho de Rodovia em Ambiente de Dados Abertos	83
Figura 23 – Lançamento do Alinhamento de tangentes e Deflexões	83
Figura 24 – Técnica de Estabelecimento dos Pontos PC e PT das Curvas.....	84
Figura 25 – Determinação da Declividade de Tangente pelo Google Maps	86
Figura 26 – Técnica de Estimativa da Superelevação	88
Figura 27 – Estimativa Gráfica de Raio e Deflexão Sobre Desenho de Rodovia	90
Figura 28 – Ilustração do Formato Gráfico dos Estudos de Correlação.....	94
Figura 29– Exemplo de Traçado de Percurso e Traçado Físico Correspondente.....	96
Figura 30 – Elementos do Segmento em Estudo – Modelo Cabo de Guarda-Chuva	97
Figura 31 – Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado	100
Figura 32 – Exemplo de Concepção do Cabo de Guarda-Chuva Modificado	102
Figura 33 – Exemplo de Trecho Segundo o Modelo Arco-Íris.....	104
Figura 34 – Regressão em Potência – Tombamentos e IRV_C – Mod. Cabo de Guarda-Chuva.....	115
Figura 35 – Regr. Pol. – N. de Motocicletas (c/vítimas) e IRV_C – Mod. Cabo de Guarda-Chuva.....	116
Figura 36 – Regressão Linear – Vit. Fatais em Automóveis e IRV_C – Modelo Cabo de Guarda-Chuva.....	116
Figura 37 – IRV_L e Capotamentos – Cabo de Guarda-Chuva Mod. $p/N_{LIM}=40$ - Serra da SP 98.....	118

Figura 38 – Regressão entre o Número de Tombamentos e IRV _C (SP 98 – Serra)	119
Figura 39 – Regressão entre o Número Total de Veículos e IRV _C (SP 98 – Serra)	122
Figura 40 – Regressão entre o Número de Motocicletas e IRV _C (SP 98 – Serra)...	123
Figura 41 – Regressão entre o Número de Colisões Traseiras e IRV _C (SP 98 – Serra)	124
Figura 42 – Regressão entre o Número Tombamentos sem Vítima e IRV _C (SP 98 – Serra)	125
Figura 43 – Regressão entre N. de Veículos sem Vít. e IRV _C (BR 116, Guapimirim/RJ), com e.....	126
Figura 44 – Regressão entre N. de Veículos sem Vít. e IRV _C (BR 116, Guapimirim/RJ), sem e.....	127
Figura 45 – Regressão entre Col. Traseiras sem Vít. e IRV _C (BR 116 Guapimirim/RJ)- com e	128
Figura 46 – Regressão entre o Col. Traseiras sem Vít. e IRV _C (BR 116, Guapimirim/RJ)- sem e	128
Figura 47 – Regressão entre o N. Col. Tras. sem Vít. e IRV _L (BR 116 – Guapimirim/RJ)- com e	129
Figura 48 – Regressão entre o N. Col. Tras. sem Vít. e IRV _L (BR 116 – Guapimirim/RJ)- sem e	129
Figura 49 – Regressão o N. Total de Veíc. com Vít. e IRV _L (BR 116, Guapimirim/RJ)- sem e	130

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Evolução Temporal da Frota Veicular, Mortos no Trânsito e Índices	34
Tabela 2 – Valores de Ângulos de <i>Ball-Bank</i> , Velocidades e Coeficientes de Atrito Lateral	41
Tabela 3 – Velocidade de Projeto (km/h)	45
Tabela 4 – Mínimos Raios Horizontais (m).....	45
Tabela 5 – Máximas Declividades de Tangentes Verticais (%).....	46
Tabela 6 – Exemplo de Determinações Geométricas Por Coordenadas do <i>Google Maps</i>	86
Tabela 7 – Elementos Dos Dez Primeiros Segmentos da SP 98.....	91
Tabela 8 – Trecho de Planilha de Estimativas de IRVs Segundo o Modelo Arco-Íris	107
Tabela 9 – Trecho de Planilha de IRVs e Acidentes por Quilômetro pelo Modelo Arco-Íris	108
Tabela 10 – Contagem de Ultrapassagens Sob Excesso de Velocidade.....	111
Quadro 1 – Classificação de Estradas Brasileiras - DNER	45
Quadro 2 – Máximas Superelevações para Rodovias Brasileiras.....	51
Quadro 3 – Correlações entre Raios, Tangentes Precedentes e Risco Viário.....	61
Quadro 4 – Custos de Acidentes Rodoviários em Rodovias Federais em 2014	71
Quadro 5 – Tipologia e Causas de Acidentes Rodoviários	73
Quadro 6 – Sequência Executiva do Modelo Arco-Íris	109

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Parcelas da Aceleração Centrípeta.....	36
Equação 2 – Raio Circular Mínimo em Função da Estabilidade.....	38
Equação 3 – Coeficiente de Atrito Transversal Máximo em Função da Aceleração Centrípeta.....	40
Equação 4 – Distância de Segurança de Frenagem.....	42
Equação 5 – Flecha Mínima do Campo de Visibilidade em Curvas Horizontais.....	43
Equação 6 – Coeficiente de Atrito Transversal em Função da Aceleração Centrípeta e Superelevação.....	49
Equação 7 – Coeficiente de Atrito Transversal Necessário em Curvas Horizontais.....	50
Equação 8 – Índice de Acidentes.....	58
Equação 9 – Nível de Segurança Rodoviária por Lamm.....	62
Equação 10 – Velocidade de Operação no Meio da Curva.....	66
Equação 11 – Fator de Modificação de Acidentes Em função da Extensão de Curva de Transição.....	68
Equação 12 – Índice de Risco Viário em Função da Velocidade e sob Abordagem Livre.....	98
Equação 13 – Índice de Risco Viário em Função da Velocidade e sob Abordagem Científica.....	98
Equação 14 – Índice de Risco Viário sob Abordagem Livre, Desconsiderando a Velocidade.....	99
Equação 15 – Velocidade final Em Uma Dada Tangente.....	99
Equação 16 – Número Limite da Restrição de Aceleração em Curvas.....	102
Equação 17 – Velocidade Máxima de Estabilidade em Curva Horizontal.....	105
Equação 18 - Velocidade Máxima de Estabilidade em Curva Horizontal.....	106
Equação 19 – Velocidade de Segurança de Visibilidade em Curva Horizontal.....	106
Equação 20 – Extensão de Trajetória de Risco Rodoviário.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

GRANDEZA	SÍMBOLO ou NOTAÇÃO	UNIDADE	CONSTANTE NUMÉRICA
Aceleração da gravidade	g	m/s ²	9,81
Aceleração centrípeta	a _c	m/s ²	
Ângulo		°; rad	
Ângulo central	AC	°; rad	
Azimute (ângulo entre uma linha e um norte)	Az	°; rad	
Centro da curva circular	O	-	
Coeficiente de atrito longitudinal	f	-	
Coeficiente de atrito transversal	f _t	-	
Coeficiente de atrito transversal máximo	f _{tmax}	-	
Coeficiente de atrito transversal necessário	f _{tnec}	-	
Coeficiente de Correlação	R	-	
Coeficiente de Determinação	R ²	-	
Comprimento de Espiral	LS	m	
Concentração de álcool no sangue	CAS	g/dl	
Curvatura	C; ρ	m ⁻¹	
Decilitro		dl	
Declividade longitudinal	l; i	%; m/m	
Aceleração	a	m/s ²	
Desenvolvimento circular	D	m	
Energia cinética	E	j	
Extensão	L	m	
Extensão Acumulada de Aceleração	L _{ac}	m	
Extensão de Curva Horizontal acrescida de Transição em Espiral	L _c	m	
Extensão da Tangente Anterior	T _A	m	
Extensão da Trajetória de Risco	L _R	m	
Fator de Modificação de Acidentes	FMA	-	
Fator de Normalização numérica	k		
Índice de Risco Viário Científico	IRV _C	-	
Índice de Risco Viário Livre	IRV _L	-	
Metro		m	
Número Limite da restrição de aceleração em Curvas	N _{LIM}		
Número total de veículos	TV	-	
Número de Motocicletas	MT	-	
Número de Automóveis	NA	-	
Número de Feridos	NF	-	
Número de Mortos	NM	-	
Número de Tombamentos	NT	-	
Número de Capotamentos	NC	-	
Número de Colisões Transversais	CT	-	
Ponto de início da curva circular	PC	-	
Ponto de intersecção das tangentes	PI	-	
Ponto de término da curva circular	PT	-	
Raio	R, r	m	
Raio de Concordância Mínimo	R _{cmin} ; r _{min}	m	

GRANDEZA	SÍMBOLO ou NOTAÇÃO	UNIDADE	CONSTANTE NUMÉRICA
Segundo		s	
Superelevação	e	%	-
Superelevação máxima	e _{max}	%	-
Tempo	T; t	s	
Trajectoria de Aceleração	γ		
Trajectoria de Risco	L _R	m	
Velocidade	V; v	m/s; km/h	-
Velocidade inicial em tangente	V _I	m/s; km/h	-
Velocidade final em tangente	V _F	m/s; km/h	-
Velocidade de operação	V _{op}	m/s; km/h	
Velocidade permitida ou diretriz	V _d ; V _P	m/s; km/h	
Velocidade máxima de estabilidade em curva	V _E	m/s; km/h	
Velocidade de segurança de visibilidade em curva	V _v	m/s; km/h	
Velocidade de Risco em Curva	V _E	m/s; km/h	
Velocidade de Risco Global	V _G	m/s; km/h	
Velocidade de Visibilidade em Curva	V _V	m/s; km/h	

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Transportation Officials</i> (Associação Americana de Rodovias e Transportes)
ABS	<i>Anti-lock Breaking System</i> (sistema anti-travagem de Freios)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CAS	Concentração de Álcool no Sangue
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DER-SP	Departamento De Estradas De Rodagem Do Estado De São Paulo
DNER	Departamento Nacional De Estradas de Rodagem
DPVAT	Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Via Terrestre
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
FDS	Função de Desempenho de Segurança
FECFAU	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i> (Administração Federal de Auto-Estradas)
FMA ou AMF	Fator de Modificação de Acidentes (<i>Accident Modification Factor</i>)
HSM	<i>Highway Safety Manual</i> (Manual de Segurança Rodoviária)
IA	Índice de Acidentes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IF	Índice de feridos
IM	Índice de mortos
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
iRAP	International Road Assessment Programme (Programa Internacional de avaliação de Rodovias)
IRV	Índice De Risco Viário
IRV _C	Índice De Risco Viário em Curvas Horizontais, Com Embasamento Científico
IRV _{CG}	Índice De Risco Viário Com Embasamento Científico, sem associar velocidade
IRV _L	Índice De Risco Viário em Curvas Horizontais, em Abordagem Livre
IRV _{LG}	Índice De Risco Viário em Abordagem Livre, sem associar velocidade
NS	Nível de Serviço
NS _{max}	Nível de Serviço Máximo
PIB	Produto Interno Bruto

RHFER	Rhafer Consultoria Empresarial e Serviços Técnicos Ltda
UF	Unidade da Federação
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
VDM	Volume Diário Médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	RELEVÂNCIA TEMÁTICA E ORIGINALIDADE DA PROPOSTA	20
1.2	HIPÓTESE E OBJETIVOS	25
1.3	JUSTIFICATIVA	26
1.4	ESTRUTURA DA TESE	28
2	REVISÃO TEMÁTICA	30
2.1	INFLUÊNCIA HUMANA NOS ACIDENTES RODOVIÁRIOS	30
2.1.1	Outros Fatores Associados à Condução Perigosa	31
2.1.2	Condução Sensorial e suas Implicações	32
2.1.3	Comportamento Reflexivo e Condicionamento	33
2.1.4	Percepção e Realidade na Condução	33
2.2	ASPECTOS JURÍDICOS	34
2.3	TECNOLOGIA EMBARCADA PARA A SEGURANÇA	35
2.4	A OFERTA RODOVIÁRIA E A FROTA DO BRASIL	36
2.5	FATORES GEOMÉTRICOS DA VIA ASSOCIADOS À SEGURANÇA VIÁRIA	36
2.5.1	A Estabilidade em Curvas Horizontais Circulares	37
2.5.2	Exigências ao Projeto Geométrico de Rodovias	44
2.5.3	Aceleração Centrípeta Descompensada	49
2.5.4	Processos de Seleção da Superelevação	50
2.5.5	Avaliação de Aceleração Centrípeta Descompensada	53
2.6	CORRELAÇÕES E FATORES INFLUENTES ENTRE GEOMETRIA E ACIDENTES	54
2.6.1	Leis restritivas à má condução rodoviária	55
2.6.2	Evolução da normatização de projeto de rodovias	56
2.6.3	Correlações entre acidentes e geometria rodoviária	57
2.6.4	Tipologia de Acidentes e Classificação de Feridos	72
2.6.5	Identificação de Locais Críticos	74
3	MÉTODO	75
3.1	SELEÇÃO DE TRECHOS RODOVIÁRIOS	76
3.2	AVALIAÇÃO DE EXCESSO DE VELOCIDADE	80
3.3	OBTENÇÃO DOS ELEMENTOS DA GEOMETRIA RODOVIÁRIA DOS TRECHOS	81
3.3.1	Obtenção dos Elementos Geométricos por Dados Abertos	82
3.3.2	Obtenção dos Dados de Geometria Em Desenhos de Rodovias	88
3.4	CRITÉRIO DE SELEÇÃO DE TIPOS DE ACIDENTES E ACERVO	92
3.5	SISTEMÁTICA DE PROCESSAMENTO DE DADOS	93
3.6	APRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS REGRESSÕES	94
3.7	MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA	95
3.8	MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA MODIFICADO	100
3.9	MODELO ARCO-ÍRIS	103
4	RESULTADOS	110
4.1	EXCESSO DE VELOCIDADE EM RODOVIAS SINUOSAS	110
4.2	REGRESSÕES CONSIDERANDO O MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA	113

4.3	CONSIDERAÇÕES AO MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA MODIFICADO	117
4.4	REGRESSÕES SEGUNDO O MODELO ARCO-ÍRIS (TESTE DO MODELO)	118
4.5	REGRESSÕES SEGUNDO O MODELO ARCO-ÍRIS (VALIDAÇÃO DO MODELO)	125
5	CONCLUSÃO	131
	REFERÊNCIAS	134
	ANEXO A – DADOS DE ACIDENTES DA SP 98 E DA RODOVIA RIO-TERESÓPOLIS	145
	APÊNDICE A – ESTABILIDADE EM CURVAS HORIZONTAIS	148
	APÊNDICE B – RAIOS MÍNIMOS DE CONCORDÂNCIA HORIZONTAL	151
	APÊNDICE C – ESTIMATIVAS DE DECLIVIDADE TRANSVERSAL COM O <i>BANK</i>	153
	APÊNDICE D – DISTÂNCIA DE SEGURANÇA DE FRENAGEM	155
	APÊNDICE E – VISIBILIDADE EM CURVAS HORIZONTAIS	158
	APÊNDICE F – PERFIL LONGITUDINAL DE RODOVIAS	159
	APÊNDICE G – A CURVATURA VARIÁVEL EM CURVAS HORIZONTAIS	161
	APÊNDICE H – AVALIAÇÃO DO EXCESSO DE VELOCIDADE POR ULTRAPASSAGEM	164
	APÊNDICE I – AVALIAÇÃO DE REPIQUE DE VELOCIDADE EM RADARES	169
	APÊNDICE J – APLICAÇÃO DO MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA EM TRECHOS DA SP 98	174
	APÊNDICE K – APLICAÇÃO DO MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA MODIFICADO EM TRECHOS DA SP 98	179
	APÊNDICE L – APLICAÇÃO DO MODELO ARCO-ÍRIS EM TRECHOS DA SP 98	182
	APÊNDICE M – APLICAÇÃO DO MODELO ARCO-ÍRIS EM TRECHO DA BR 116 – MUNICÍPIO DE GUAPIMIRIM/RJ	189

1 INTRODUÇÃO

A segurança rodoviária é um tema de abordagem que se pode considerar contemporânea ao início do processo evolutivo da tecnologia que permite maiores velocidades. Quanto maior a velocidade veicular maior a quantidade de energia cinética acumulada, aumentando a severidade de possíveis acidentes. Desta forma, a revisão de tema estudado há várias décadas exige seleção acurada de trabalhos, que apresentem novas proposições e que aprofundem as análises quanto à relevância na correlação entre o traçado da via e os acidentes resultantes.

1.1 Relevância Temática e Originalidade da Proposta

Em termos mundiais, o modo de transporte rodoviário é o de maior espectro social e quase que o único utilizado nas viagens “porta a porta”. Os veículos rodoviários, quando comparados com aqueles associados aos demais modos de transporte, são de fácil aquisição devido ao amplo mercado e baixo preço relativo. Entretanto, por seu uso massivo, condução muito frequente por motoristas não profissionais, alta concentração de veículos mal mantidos e oferta de vias de amplo espectro de qualidade, que podem variar desde superfícies pavimentadas até aquelas sem qualquer tratamento específico, incrementam a frequência e a severidade de acidentes que afetam até mesmo as economias dos países mais desenvolvidos.

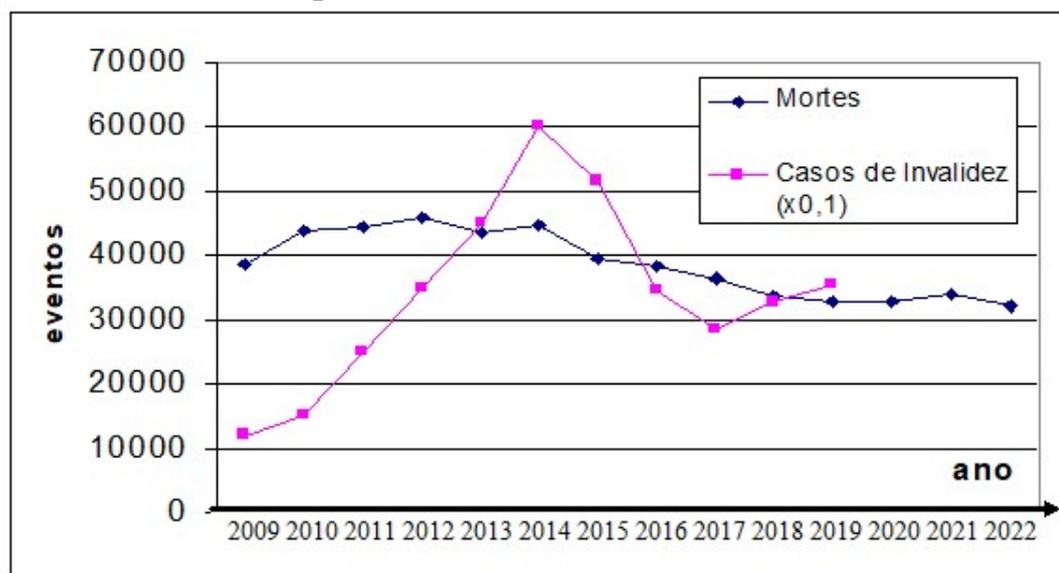
As estatísticas mundiais anuais sobre os acidentes rodoviários indicam valores da ordem de 1,35 milhão de mortos e de gastos da ordem de 3% do Produto Interno Bruto (PIB) de cada país (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2023). A participação do modo rodoviário nas estatísticas de mortalidade mundial evoluiu da décima causa em 2000 para a oitava em 2016 (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). Há também a questão dos custos envolvidos nos acidentes graves. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada (IPEA, 2006), o custo global dos acidentes rodoviários nacionais foi de R\$ 21 bilhões em 2004, quando foram registradas 35 mil mortes. Estes dados indicam custo de US\$ 200.000,00 por morte no trânsito brasileiro, em modelagem de custos onde se considera perda

veicular, potencial de trabalho até o final da vida, custos sociais, do mobiliário viário ou urbano, dentre outros.

A pobreza de uma nação também é fator que potencializa o quadro de gravidade da segurança rodoviária. Os países em desenvolvimento respondem por 85% do total de mortos em acidentes rodoviários em termos mundiais, bem como por 90% dos anos de vida perdidos por inaptidão ou morte, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2004).

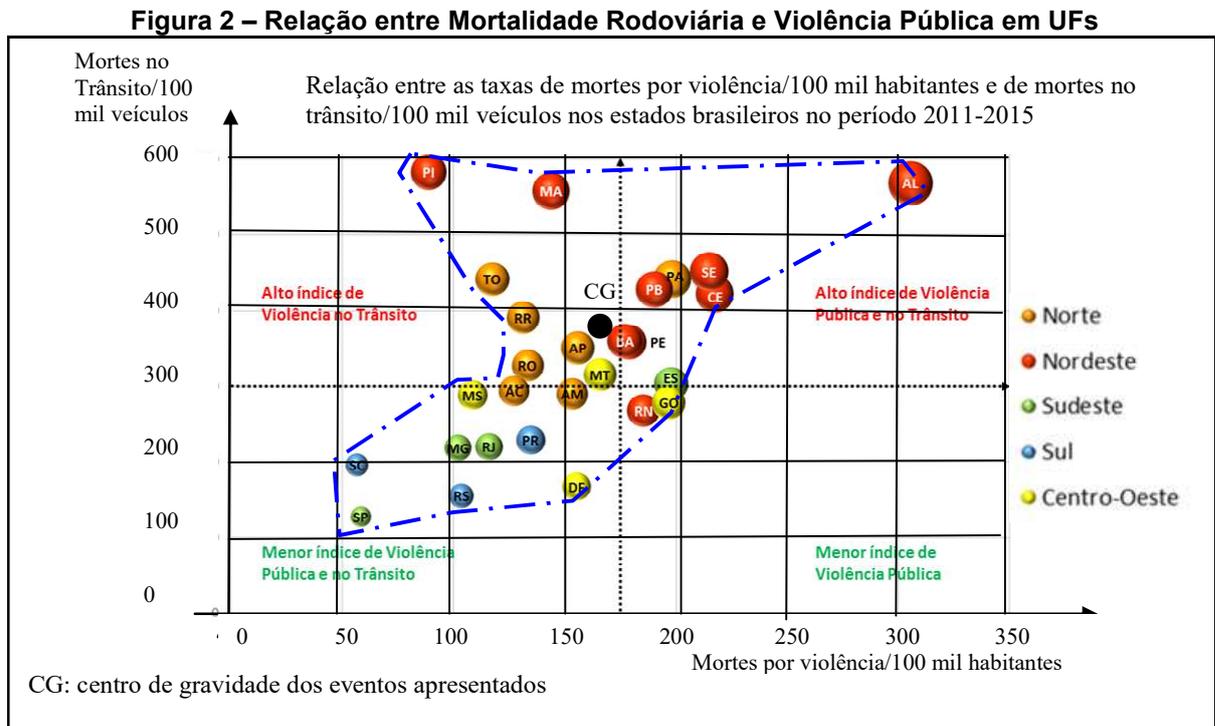
A magnitude da potencialidade de impacto humano e social decorrente de graves acidentes rodoviários também pode ser avaliada pela quantidade de casos de morte e de invalidez advindas de graves sinistros. A Figura 1 apresenta gráficos de número de casos registrados junto ao sistema de seguridade nacional e pelo Seguro Obrigatório de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestres (DPVAT) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PREVENÇÃO DOS ACIDENTES DE TRÂNSITO, 2018). O alto número de acidentes graves com mortos se associa a outro aspecto: o número de feridos graves, bem como de mortes que tenham ocorrido posteriormente aos sinistros. Parte dos que não faleceram no resgate dos sinistros ficaram com restrição motora elevada, gerando sofrimento dentre os que compõem seu ambiente de relacionamento pessoal a familiar, além de custos elevados nas questões hospitalar e previdenciária.

Figura 1 – Mortes no Trânsito Brasileiro



Fonte: Adaptado de: Vias Seguras (2019); Associação Brasileira de Prevenção dos Acidentes de Trânsito (2018); Portal do Trânsito e Mobilidade (2023).

A comparação entre a mortalidade rodoviária e a violência pública, tal como compilada pelo Observatório Nacional de Segurança Viária (Portal ONSV, 2018) é apresentada na Figura 2. Entre os grupos de dados para Unidades da Federação (UF), observa-se aquelas em condição desfavorável, onde menores renda per capita e nível de escolaridade dificultam a efetividade de políticas públicas de melhoria. A abordagem geral auxilia no estabelecimento de ações de minimização de violência pública, segundo diretrizes federais propostas para 2018. Verifica-se as regiões nordeste e norte como aquelas com taxas mais elevadas tanto de mortes no trânsito quanto de violência pública. Estratégias de combate à mortalidade rodoviária, portanto, devem ser estabelecidas por região, partindo-se da premissa do conhecimento do perfil característico do motorista.



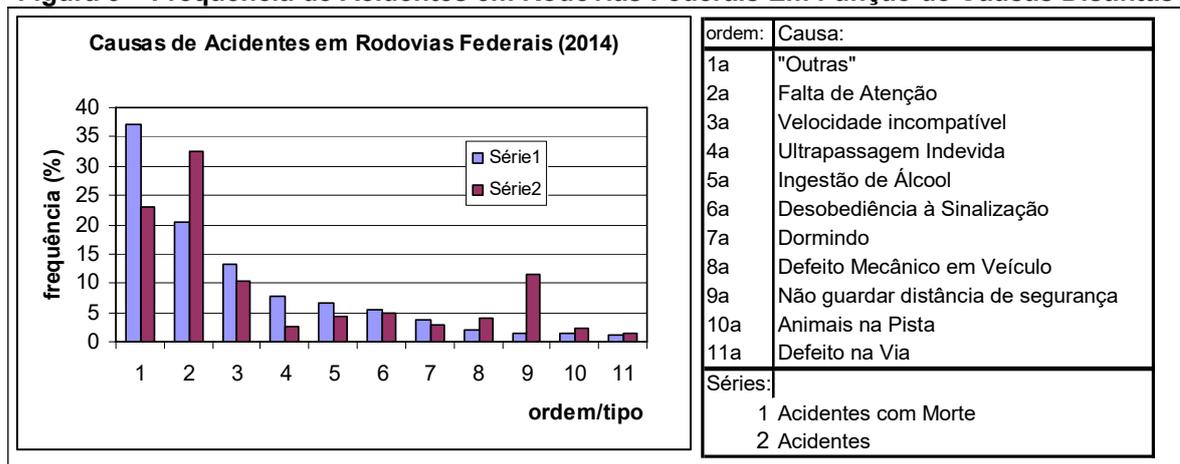
Fonte: Adaptado de: Portal ONSV (2018)

As causas dos acidentes rodoviários podem ser agrupadas em inabilidade na condução dos veículos, fatores veiculares ou de oferta rodoviária. Dentre as possíveis causas de fatalidade, destacam-se o excesso de velocidade e a perda da capacidade de resposta ao volante, decorrentes de situações como dirigir com sono ou sob o efeito de drogas lícitas ou ilícitas. A questão educacional também se destaca neste contexto, contribuindo com a “cultura da velocidade”, que se impõe

até como um questionamento ao controle da velocidade por radares, pois parte dos motoristas subentende que sua natureza é exclusivamente para arrecadação.

A Figura 3 apresenta causas distintas de acidentes rodoviários com morte e totais, classificados por frequência decrescente a partir de sinistros fatais, denominados de série 1, em rodovias federais, no ano de 2014 (IPEA, 2015). A série 2 é de acidentes e se apresenta em colunas justapostas às da série 1. A maior percentagem é de causa não definida; a segunda maior, devida à atenção do motorista e a terceira maior, ao excesso de velocidade que, neste caso, correspondente a 13,1% dos sinistros com morte e 10,5% de todos os sinistros. Esta causa é a que tem maior objetividade em campanhas de redução à mitigação de acidentes: estabelecer e impor redução de velocidade.

Figura 3 – Frequência de Acidentes em Rodovias Federais Em Função de Causas Distintas



Fonte: IPEA (2015)

Considerando-se apenas os acidentes com morte, correspondendo a aproximadamente 13% dos sinistros segundo a Figura 3, e o total anual de mortos, que é da ordem de 30 a 50 mil, entre 2009 e 2022, de acordo com a Figura 1; pode-se inferir que 3.900 a 6.500 vidas poderiam ser salvas anualmente no Brasil, com ações específicas quanto ao excesso de velocidade.

Quanto ao comportamento dos motoristas, campanhas de conscientização do risco do excesso de velocidade já fazem parte das ações comuns na busca de minimização da participação desta causa em graves acidentes. O respaldo tecnológico veicular para proteção dos ocupantes quanto à minimização de risco de acidentes sob condições de derrapagem já está efetivado, sensores para alertar o

risco de acidentes também já fazem parte da oferta em parte da frota. Quanto à proteção veicular para veículos que sofram impactos em velocidades altas, também já foram efetivadas ações legais de inserção de itens como cintos de segurança, *air bags* e estrutura veicular que absorva grande parte da energia do choque, antes de a transferir aos ocupantes (Brasil, 2022-a).

A automação que está em curso, como a robotização, pode ser considerada como uma próxima fase. Sob a ótica da oferta viária, projetos são desenvolvidos com base em valores limites de raios horizontais e verticais, declividades de rampa bem como de superelevações a compensar parte ou toda a aceleração centrípeta.

A imposição de redução de velocidade na via depende do nível de serviço e da sinuosidade geométrica, em paralelo à oferta de dispositivos de sinalização e controle.

No desenvolvimento de projetos de rodovias há clássica abordagem da adoção de valores limites a partir da consulta em norma e critérios técnicos, sem análise integrada, onde um determinado limite não é influenciado por outro, em paralelo à questão de que os valores limites foram estabelecidos com base em Física Aplicada e conjecturas. Na literatura clássica, não há ênfase em projetos associados a índices de acidentes.

Não é usual abordar o projeto da rodovia ou de melhoria da rodovia com base na análise do movimento veicular. Há trechos rodoviários com retas entre curvas de raios elevados onde os motoristas conseguem trafegar em velocidade superior à permitida com sensação de segurança, sucedidos por trechos de traçado sinuoso, composto por sequência de curvas de raios e retas diminutos, “forçando” motoristas a frenagens inesperadas acarretando maior risco operacional. Não basta a simples redução de velocidade permitida em trechos de geometria de menor qualidade. Motoristas tendem a manter a velocidade, por simples entendimento de que estão “na mesma rodovia” e “não há razão para alterar o movimento”, sob premissa de sensação de segurança gerada em trechos anteriores, de traçado mais suave, onde já praticavam velocidades excessivas à permitida. Não priorizam o respeito à sinalização, que tem perfil passivo.

Em abordagem clássica de projetos de rodovias, raios horizontais são simplesmente verificados se são superiores a valores mínimos de norma, tal como se observa no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1999). Não se analisa a influência na

segurança operacional, quando da inserção de diferentes raios com veículos operando com distintas velocidades. Há lacuna quanto à influência da extensão e declividade de uma tangente precedente a uma dada curva horizontal. Não é prática usual o estudo dos elementos geométricos de forma conjunta, quando diferentes magnitudes de um dado elemento físico podem influenciar na velocidade e gerar risco não avaliado em outros elementos de distintas magnitudes. Ao término de longa tangente em descida, curvas acentuadas tendem a acarretar local de maior risco operacional. Em outra abordagem, traçados sinuosos acarretam movimento de oscilação lateral que pode gerar desorientação ao motorista e maior risco de derrapagem, em paralelo à questão da visibilidade.

A originalidade da proposta está no estabelecimento de modelo de análise, onde grandezas físicas rodoviárias estão agrupadas em índices de risco e associadas a bancos de acidentes; sob premissa de que a alteração de uma grandeza pode interferir na outra.

1.2 Hipótese e objetivos

Veículos rodoviários tendem a acelerar em tangentes em descida, cuja taxa de variação da velocidade depende da declividade, e a velocidade final, da extensão. Ao término desta rampa, caso a velocidade seja maior a muito maior que a permitida, pode caracterizar ambiente incompatível com o raio e superelevação de uma possível curva sucedânea. Declividades e extensões de tangentes precedentes a curvas de determinados raios e superelevações precisam ser analisadas de forma conjunta, para que se tenha o efetivo controle da segurança do local em estudo em função da velocidade real e não simplesmente em função da velocidade de projeto.

Este trabalho tem como hipótese o estabelecimento de modelo que permita associar características geométricas de trechos rodoviários e dados de acidentes, em ambiente de reduzida eficácia de controle de velocidade, com foco inicial em vias de pista única e mão dupla de tráfego; onde as acelerações laterais e longitudinais sejam indutoras de sinistros. Propõe-se um modelo que associa esses elementos geométricos a acidentes, validado por análises estatísticas e aplicado em estudos de caso no sudeste brasileiro, utilizando dados de campo e abertos. Além disso, busca-se uma compreensão mais aprofundada da dinâmica veicular que conduz a

acidentes, sem a necessidade de se aguardar a ocorrência de significativo número de acidentes, para a tomada de decisões de melhorias ou estabelecimento de dispositivos atenuadores de velocidade.

Os objetivos específicos incluem:

- Desenvolver um modelo correlacional entre elementos da geometria rodoviária e acidentes ocorridos ao longo de período preferencial de 10 anos, definindo uma trajetória de risco com base na velocidade e outros parâmetros relacionados.
- Propor equações que associem as variáveis estudadas conforme o modelo.
- Validar o modelo em trecho rodoviário, verificando sua aplicabilidade e precisão.
- Analisar a relação funcional entre as variáveis, utilizando coeficientes de determinação (R^2).

1.3 Justificativa

Ampliar o entendimento da relação entre geometria e índices de acidentes é uma maneira eficaz de estabelecer premissas para uma melhor fiscalização, bem como para identificar pontos ideais para instalar soluções atenuadoras de velocidade antes que a concentração de acidentes ocorra.

Apesar das diversas campanhas e ações implementadas ao longo de décadas para reduzir a acidentalidade no trânsito brasileiro, os resultados têm se mostrado limitados. Desafios culturais, legais e financeiros limitam as estratégias de fiscalização de velocidade e outras infrações de trânsito, evidenciando a necessidade de novas abordagens metodológicas. Este estudo contribui para o desenvolvimento contínuo de métodos preditivos e estratégicos que possam ser aplicados ao longo de toda a via, não condicionados à análise exclusiva de pontos onde acidentes graves já tenham ocorrido em alta concentração.

O foco deste trabalho é a modelagem da trajetória veicular, utilizando uma abordagem matemática baseada em um banco de dados de acidentes para estabelecer correlações significativas. A trajetória veicular é modelada para

determinar equações correlacionais com coeficientes de determinação significativos, considerando uma gama de valores para velocidade e outros coeficientes relevantes. Diferentemente do raio fixo de curvas horizontais circulares, o veículo pode desviar lateralmente para alterar seu raio de giro, uma prática que apesar de percebida como segura pelo motorista, pode corresponder a padrões de movimento de acidentes anteriores.

A análise proposta amplia o escopo tradicional, considerando critérios em normas técnicas, que não associam taxas de incidência de sinistros aos elementos da via. As normas vigentes de projeto estão limitadas à análise isolada de grandezas, tais como raio mínimo e declividades máximas. Futuras pesquisas poderão refinar as expressões matemáticas para desenvolver modelos que sejam aplicáveis universalmente ou adaptáveis regionalmente, considerando as variações comportamentais entre motoristas de diferentes regiões do Brasil.

A escolha de rodovias no Sudeste para testes e validações é justificada pela proximidade e familiaridade do autor com a região. Esta abordagem busca, portanto, fornecer um método eficaz e objetivo quanto à influência da geometria rodoviária na segurança viária, através de modelo analítico.

A delimitação da zona de obtenção de dados de campo, a do sudeste brasileiro, baseia-se na facilidade quanto à distância ao Campus da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e a maior concentração de tráfego motorizado dentre as unidades da federação, bem como na proximidade dos sítios de pesquisa de campo e facilidade de obtenção de informações sobre acidentes.

Como as condições de tráfego motorizado se interdependem a valores de níveis de serviço, cita-se que a taxa de motorização no Estado de São Paulo é da ordem de 1,6 habitante por veículo rodoviário, que é superior a 2,3, válido para o Brasil, segundo o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2016) e o IBGE (2016), indicando maior influência regional da frota nas estatísticas de acidentes. Quanto maior este índice, maior deve ser a quantidade de viagens e, em consequência, maior o risco de sinistros.

1.4 Estrutura da Tese

A estrutura da tese, condicionada às normas científicas e condições de apresentação do programa de pós graduação da FECFAU/UNICAMP, inclui os elementos pré-textuais, desde capa até ao sumário, que estão apresentados antes dos elementos textuais.

A introdução expõe o tema de forma ampla, com destaque aos impactos sócio-econômicos, com justificativas teóricas e práticas. A originalidade do trabalho também está presente, mesmo se considerando que o tema da pesquisa já tem abordagem centenária, mas as soluções ainda não se mostram suficientes para a redução efetiva dos índices de acidentes e melhor compreensão das causas geradoras.

A revisão dos trabalhos já efetuados sobre a segurança rodoviária, tanto em termos genéricos quanto associados à geometria, segue a introdução, visando apresentar, de forma qualitativa, como o tema tem sido abordado; como acidentes são associados a elementos geométricos de rodovias. Há realce sobre lacunas na associação dos fatores e grandezas envolvidas no tema.

A fundamentação Teórica está apresentada em seguida, com proposta de modelos e métodos de avaliação. A apresentação dos modelos propostos inclui a descrição dos fatores influentes, selecionados em função da análise do leque de abordagens efetuada até ao presente momento. As expressões matemáticas foram concebidas a partir de cada modelo estudado, visando posterior aplicação em trechos de rodovias, para a devida avaliação. Adotou-se o parâmetro “coeficiente de determinação” no processo de testes, a partir de regressões entre índices de risco viário ou quantidades de acidentes. A teoria do conhecimento foi aplicada de forma a obter nova dinâmica de associação de elementos rodoviários que imponham possíveis ações desestabilizadoras nos veículos que trafegam a velocidades superiores à permitida em traçados sinuosos.

Em seguida, exibem-se os resultados, cuja abordagem epistemológica dos modelos e expressões matemáticas correspondentes foi efetivada em dois sítios de testes, na forma de trechos rodoviários.

As sugestões de linhas pesquisa e conclusão do trabalho estão em sequência, onde resultados dos modelos e restrições de uso foram relatados,

precedendo a lista de referências. O Anexo e Apêndices concluem a sequência de apresentação do trabalho.

2 REVISÃO TEMÁTICA

A incidência de acidentes rodoviários graves continua sendo influenciada por deficiências tecnológicas, infraestruturais, veiculares e humanas, mesmo após mais de um século de estudos nesta área. É essencial que a ciência continue aprofundando-se neste tema para desenvolver e implementar programas eficazes que mitiguem os riscos associados à condução de veículos. Os estudos destacam a necessidade de abordagens heurísticas para analisar os acidentes, considerando aspectos geométricos e físicos das vias, bem como questões mecânicas e eletrônicas dos veículos. Tais pesquisas devem também abordar as competências e falhas dos condutores para dirigir de forma segura e eficiente, fundamentando a implementação de novas políticas e projetos para a segurança viária.

A obtenção de elementos da geometria de rodovias a partir de dados abertos está associada a algum nível de erro, que não devem ser suficientes para influir significativamente nos resultados com estudos da trajetória veicular. Wasserman et Al (2019) utilizaram destes dados para estudos viários com foco em veículos.

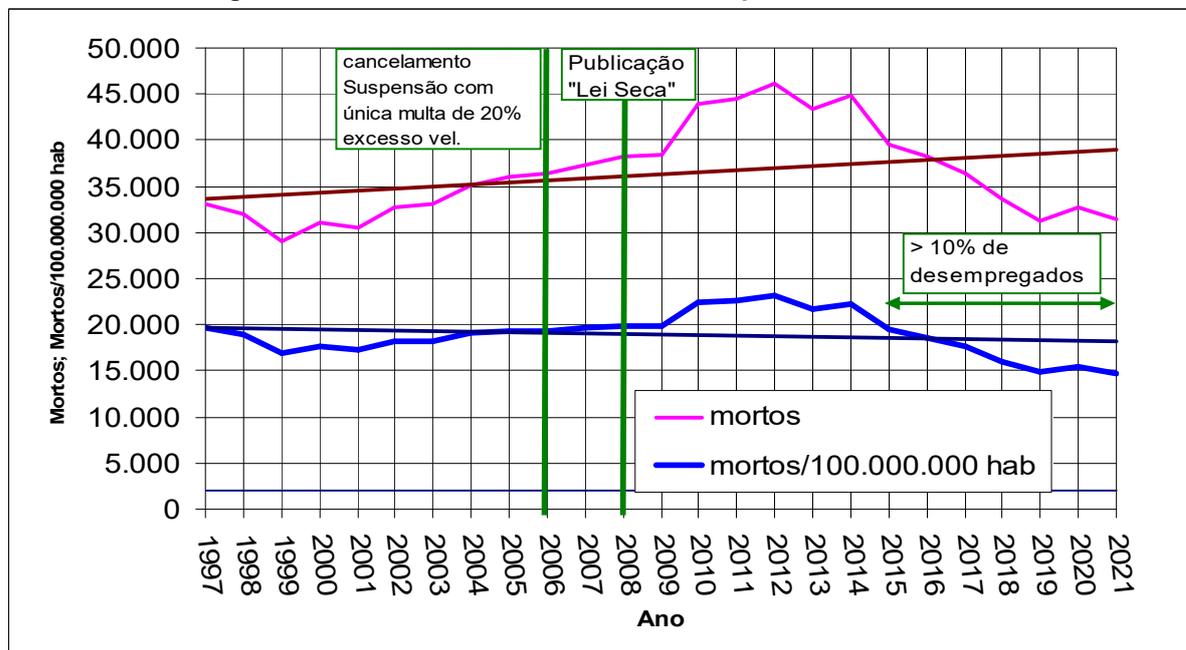
2.1 Influência Humana nos Acidentes Rodoviários

A cultura de velocidade entre motoristas desempenha um papel significativo nos acidentes rodoviários. Muitos condutores assumem que sua habilidade de controle do veículo justifica velocidades acima dos limites estabelecidos, ignorando as regulamentações de trânsito. Esta percepção é agravada pelo uso frequente de dispositivos móveis que, ironicamente, fornecem alertas sobre radares e fiscalização, potencializando comportamentos de risco. A combinação da emoção induzida pela velocidade e a ilusória "sensação de poder" sobre o veículo frequentemente aproxima os motoristas dos limites de estabilidade do veículo, aumentando a probabilidade de acidentes graves.

Além disso, o setor automobilístico promove o trinômio velocidade, potência e prestígio, reforçando a atração pela condução de alto risco. Portanto, é crucial estabelecer controles rigorosos e restrições efetivas para reduzir a incidência e a severidade dos acidentes.

A taxa de desemprego, que no Brasil variou de 8% entre 2012 e 2014 e para 12% entre 2015 e 2021 (IBGE, 2022), também tem impacto na segurança rodoviária. A diminuição na quantidade de viagens devido ao desemprego e à redução da renda per capita correlaciona-se com uma redução nos índices de mortalidade no trânsito, sugerindo uma relação direta entre a economia e a frequência de deslocamentos veiculares, como se observa na Figura 4. A redução do volume de tráfego, conseqüentemente, tende a diminuir o número de mortes associadas a acidentes rodoviários.

Figura 4 – Mortos no Trânsito Brasileiro – período 1997 a 2021



Fontes: Da Confederação Nacional dos Municípios (2009). Vias Seguras (2022). *Population Pyramid* (2018). Adaptado pelo Autor.

2.1.1 Outros Fatores Associados à Condução Perigosa

Diversos fatores contribuem para a prevalência de acidentes rodoviários graves, incluindo o uso de substâncias lícitas e ilícitas, fadiga ao volante, e distrações como o uso de dispositivos de comunicação e música alta, especialmente entre motoristas jovens. Estes elementos aumentam significativamente os riscos nas estradas, impactando as estatísticas nacionais de acidentes de trânsito.

Habib, Tawfeed e El-Basyouny (2022) avaliaram a influência da distância de visibilidade de frenagem na geração de acidentes, em função da resposta dos

motoristas, da velocidade e de elementos geométricos de curvas horizontais e verticais, com destaque à velocidade recomendada em um dado trecho, referenciada como sendo a *advisory speed limit (ASL)*, que é inferior à velocidade permitida. Concluíram que são necessárias análises mais robustas em trechos rodoviários, em termos de aspectos geométricos, dentre outros fatores, para se estabelecer melhores correlações entre estas grandezas e índices de colisões.

2.1.2 Condução Sensorial e suas Implicações

O cérebro humano, centro das decisões de condução, baseia-se em informações sensoriais para responder a situações de risco nas estradas. A visão é crucial para antecipar e reagir a obstáculos, enquanto a audição ajuda a identificar sinais de perigo, como buzinas. Esses sentidos são essenciais para a condução segura, mas podem ser comprometidos por distrações ou condições inadequadas de condução.

Akin et al (2022) elaboraram um trabalho sobre as causas geradoras de acidentes onde o foco é a influência do motorista na geração de acidentes. Desenvolveram uma abordagem do problema utilizando regressões binomiais sobre bancos de dados e também com base em dados gerados por *Machine Learning*. Os acidentes foram classificados segundo causas como sono, distração, excesso de velocidade, imprudências, dentre outros; de uma rodovia dos Emirados Árabes Unidos. Observaram a importância de ações mais incisivas em termos legais, de eletrônica embarcada para efetivar limites de uso veicular além de foco em educação no trânsito, concluindo com a citação da principal causa, a deficiência de melhores padrões de condução por parte dos motoristas.

Lo, Chiu e Tseng (2023) desenvolveram um modelo de simulador de tráfego para avaliar a influência de parâmetros humanos na qualidade da direção, tais como o controle de inibição, a alternância de tarefas e a tomada de decisões. A frequência de respostas tem grande amplitude perante estes estímulos aos motoristas. Efetuaram medições de respostas quanto a estímulos específicos de “placa de pare”, dentre outros, para grupo de 30 participantes. A melhor resposta foi quanto à placa enquanto ocorreu alta violação do limite de velocidade.

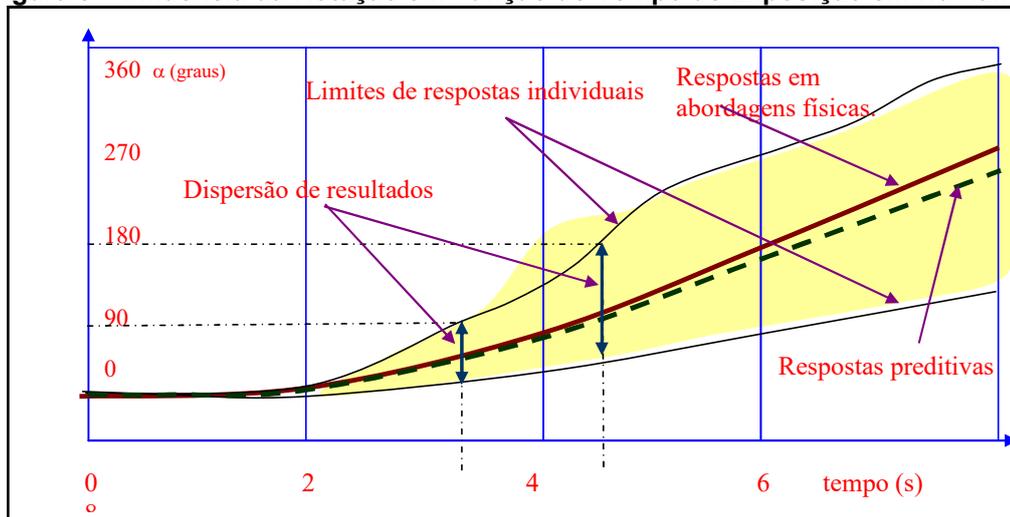
2.1.3 Comportamento Reflexivo e Condicionamento

A resposta reflexa a situações inesperadas é uma habilidade vital para os motoristas, exigindo treinamento e repetição para desenvolver reações adequadas a eventos conhecidos que requerem manobras evasivas. Este conceito é suportado pelo paradigma de condicionamento pavloviano¹, conforme estudado em modelos comportamentais como a Caixa de Skinner² (Schettino et al., 2022).

2.1.4 Percepção e Realidade na Condução

Estudos como os de Nooij et al. (2016) demonstram a discrepância entre a percepção e a realidade física durante a condução, especialmente em condições de visibilidade reduzida ou iluminação inadequada. A pesquisa destaca como as percepções distorcidas de trajetória e velocidade podem levar a erros significativos de julgamento e acidentes nas estradas, particularmente em curvas fechadas e estradas de montanha, onde a percepção da rotação e inclinação pode ser gravemente afetada, tendo o resultado reproduzido graficamente na Figura 5.

Figura 5 – Influência da Rotação em Função do Tempo de Exposição em Humanos



Fonte: Adaptado de Nooij et al. (2016)

¹ O condicionamento pavloviano diz respeito às relações entre estímulos e resposta. Ele serve para explicar o comportamento involuntário e as reações emocionais condicionadas.

² Uma caixa de Skinner é um aparelho totalmente fechado em que um animal ali preso pode apertar uma barra ou chave para conseguir algum tipo de recompensa. As respostas do animal a cada estímulo são registradas a fim de verificar qual a quantidade de estímulo necessária para atingir comportamentos previstos ou esperados.

2.2 Aspectos Jurídicos

A regulamentação do transporte rodoviário começou no início do século XX com a introdução do primeiro código de trânsito em Nova Iorque em 1909, proposto por William Phelps Eno (ENO CENTER OF TRANSPORTATION, 2019). Essa iniciativa marcou o início de uma era legalista de ações mitigadoras no trânsito. A eficácia de um código de trânsito é avaliada por sua capacidade de reduzir acidentes e melhorar a fluidez do tráfego. O governo tem o dever de fiscalizar, adaptar-se às inovações tecnológicas e jurídicas, e promover campanhas de conscientização. A complexidade do ambiente sócio-político exige que essas medidas sejam comunicadas de forma clara para garantir a aceitação e cooperação dos motoristas.

O Código de Trânsito Brasileiro (CTB) teve suas primeiras versões em 1941 e 1966, com a versão atual promulgada em 1997 (Vilela, 2019). Entre 1980 e 2015, a taxa de mortalidade no trânsito permaneceu relativamente estável, com uma média de 18,63 mortes por 100.000 habitantes e um desvio padrão de 1,85, conforme dados da Tabela 1. Nota-se também uma redução de 3 pontos na mortalidade entre 1995 e 2000, período de implementação do novo CTB, sugerindo um impacto significativo deste na redução da imprudência ao volante.

Tabela 1 – Evolução Temporal da Frota Veicular, Mortos no Trânsito e Índices

ano:	1.960	1.970	1.980	1.990	2.000	2.010	2.020
Frota (10 ³ veículos)	309	2.495	9.900	13.908	29.723	64.818	107.948
Número de Mortos			19.851	28.470	28.995	42.844	30.168
Total de Hab (10 ⁶)	72,2	95,3	121,2	149,4	175,3	196,8	213,2
Mortos/10 ⁵ Hab.			16,4	19,1	16,5	21,8	14,2
Hab./veículo	233,7	38,2	12,2	10,7	5,9	3,0	2,0

Fontes: DENATRAN (2016). Vias Seguras (2022).

Alterações nas leis de trânsito que acarretam menor penalização aos motoristas podem contribuir para uma percepção reduzida do risco de perder a Carteira Nacional de Habilitação (CNH), tal como a modificação do artigo 218 do CTB, em 2006; que classificou o excesso de velocidade superior a 20% como infração grave em vez de gravíssima (Brasil, 2006), levando a um aumento nas taxas de mortalidade observadas entre 2006 e 2012, tal como se pode observar na Figura 4. A implementação da "Lei Seca", em 2008 (Brasil, 2008), visou reduzir a condução sob o efeito de álcool, mas não foi suficiente para prevenir um aumento

nas mortes no trânsito nos anos seguintes, pelo fato de que o número de mortos sofreu novo aumento, fato também observável na Figura 4.

A citação de limite de velocidade de 110 km/h para rodovias de pista dupla que não tenham sinalização regulamentada (Brasil, 1997), não está embasada em questões técnicas e gera premissa que induz que o limite de velocidade depende, na realidade, de questões políticas.

2.3 Tecnologia Embarcada para a Segurança

As inovações em segurança veicular têm sido fundamentais para mitigar a severidade dos acidentes. Por exemplo, a energia cinética de uma motocicleta de 150 kg aumenta quatro vezes ao dobrar a velocidade de 60 km/h para 120 km/h, elevando drasticamente o risco de lesões graves em caso de acidente (Khorasani-Zavareh *et al*, 2015). Quanto a automóveis, o habitáculo de segurança foi introduzido pela Mercedes Benz em 1959 (MERCEDES BENZ GROUP MEDIA, 2009), conquanto que *airbags* e sistemas ABS foram recentemente incorporados, exemplos tecnológicos relativos à proteção dos ocupantes.

O envelhecimento da frota veicular no Brasil e a lentidão na adoção de tecnologias de segurança modernas, como *airbags* e ABS, que só se tornaram obrigatórios em 2014, de acordo com dispositivo legal estabelecido 3 anos antes (Brasil, 2011); indicam a necessidade de políticas com foco específico em segurança e que sejam aplicadas de forma mais célere. A maior parte dos veículos que rodavam no Brasil até 2021, ainda circula sem esses dispositivos de segurança, representando um risco adicional (SINDIPEÇAS, 2022).

A robotização dos veículos pode revolucionar a segurança ao minimizar a necessidade de intervenção humana e melhorar a previsibilidade e resposta a situações de risco. No entanto, há desafios tecnológicos e éticos significativos, como a capacidade de reconhecer e reagir adequadamente aos pedestres de diferentes etnias, em função das diferenças de respostas em função da cor da pele, que precisam ser superados para que a automação completa seja viável e segura (Wilson; Hoffman; Morgenstern, 2019).

2.4 A Oferta Rodoviária e a Frota do Brasil

De acordo com a Tabela 1, havia 233 habitantes por veículo rodoviário no Brasil, em 1960. Em 2020, a relação passou a 2 habitantes por veículo; indicando crescimento superior a 117 vezes em 60 anos. Esta alta taxa de motorização, combinada com a inadequação da infraestrutura rodoviária, contribuiu para a elevada incidência de acidentes graves.

A análise qualitativa de rodovias passou a ser fundamental na busca de ações para minimizar o impacto sócio-econômico relativo aos acidentes decorrentes desta alta taxa de motorização, em paralelo aos projetos de expansão da malha rodoviária. O Programa de Avaliação Internacional de Rodovias (iRAP) é uma das abordagens que ajuda a identificar e mitigar os riscos em rodovias ao redor do mundo (iRAP, 2021).

2.5 Fatores Geométricos da Via Associados à Segurança Viária

A configuração geométrica das rodovias desempenha um papel de destaque na segurança veicular. A força centrípeta necessária para manter um veículo em uma curva é influenciada pelo raio, pela superelevação, pela velocidade do veículo, e pelas condições da superfície, como descrito pela Equação 1, válida para qualquer sistema coerente de unidades (FWA, 2006) e detalhado no [Apêndice A](#). A correta compreensão e aplicação desses princípios físicos são fundamentais para o design de estradas para que promovam a segurança e minimizem os riscos de acidentes.

$$a_c = \frac{v^2}{r} = f_t \times g + g \times e \quad (1)$$

Em que:

a_c : aceleração centrípeta (m/s^2)

v : velocidade (m/s)

r : raio horizontal (m)

f_t : coeficiente de atrito transversal

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

e : superelevação

A Associação de Pesquisa em Transportes e Rodovias (ROAD AND TRANSPORTATION RESEARCH ASSOCIATION, 2008, p. 28) sugere considerar valores para a máxima extensão de segmentos retilíneos entre curvas horizontais,

para se evitar fadiga. Trechos de retas longas, sucedidas por curvas horizontais fechadas tendem a caracterizar local de maior risco, mesmo quando a sinalização de advertência está presente.

O projeto do perfil longitudinal, desenvolvido após a planta, deve ter como uma das premissas o lançamento das tangentes de forma a minimizar volumes de terraplenagem, bem como prover a via com maior capacidade de tráfego e baixo risco operacional. Há tendência de aumento excessivo de velocidade veicular quando os segmentos retilíneos verticais apresentam elevada declividade; em função da parcela da força-peso na direção do deslocamento. Para se evitar excesso de velocidade em descidas, acionam-se freios que, se usados de forma contínua, podem levar ao superaquecimento em função de *fading*, que corresponde à fadiga térmica, gerando ineficiência (Brossi, 2002, p. 27). Quando um veículo nestas condições atinge uma curva horizontal de raio reduzido, soma-se a força centrípeta à força de frenagem longitudinal, limitadas por coeficientes de atrito específicos, caracterizando típico cenário de ocorrência de sinistros.

A geometria das rodovias brasileiras sofreu considerável alteração após o término da Segunda Grande Guerra, com destaque ao aperfeiçoamento tecnológico dos motoescrêperes, por Robert G Tournapull em 1938 (Berry, 2022). A forte restrição do movimento de terra relativo à fase anterior, impunha eixos rodoviários muitos sinuosos em regiões montanhosas. Com o advento das novas tecnologias na terraplenagem, os traçados passaram a ser mais suaves. Motoristas são submetidos à forte mudança da oferta geométrica, na transição de rodovias recentes para as de traçado antigo, sem que necessariamente sejam notificados destas alterações.

2.5.1 A Estabilidade em Curvas Horizontais Circulares

A integração entre segmentos retilíneos, comumente chamados de tangentes, e curvas horizontais é crucial na engenharia rodoviária. Essa concordância exige uma abordagem rigorosa em Física e Matemática, com foco na aceleração centrípeta e na concordância angular das retas com a curvatura do círculo representativo.

A segurança em curvas horizontais depende do raio de curvatura, que deve ser projetado para assegurar tanto a visibilidade quanto a estabilidade veicular. A

visibilidade adequada é necessária para permitir reações seguras como frenagens ou ajustes de velocidade, especialmente quando obstáculos ou veículos mais lentos são detectados. A estabilidade em curva é calculada para garantir que os veículos possam manter o controle sem derrapar, considerando variáveis como a velocidade de projeto, a superelevação, o coeficiente de atrito transversal e a aceleração da gravidade, detalhadas na Equação 2 e discutidas mais amplamente no [Apêndice B](#).

$$R_{c \min} = \frac{v^2}{127 \times (f_{t \max} + e_{\max})} \quad (2)$$

Em que:

$R_{c \min}$: raio mínimo de concordância horizontal (m)

v: velocidade de projeto (km/h)

$f_{t \max}$: coeficiente de atrito transversal máximo

e_{\max} : superelevação máxima

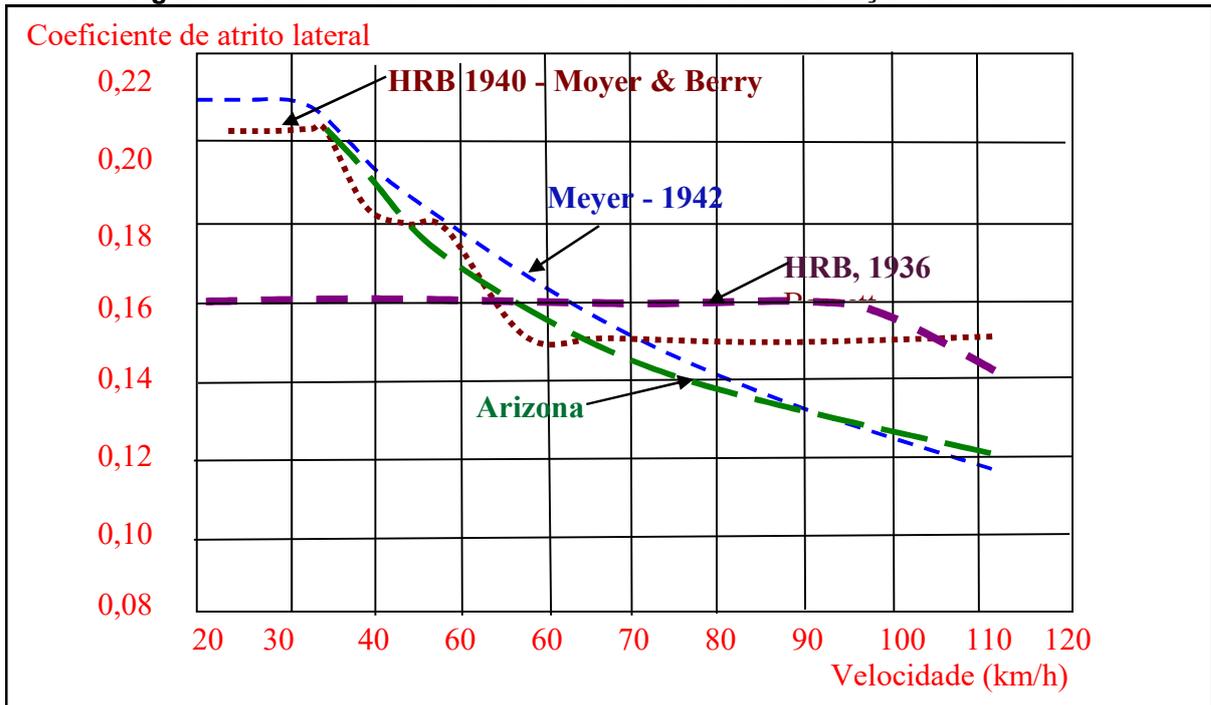
A superelevação rodoviária máxima recomendada pela Associação Americana de Autoestradas e Transportes é de 12% (AASHTO, 2001), adequada para gerenciar a força centrípeta em curvas. Além disso, a AASHTO define o coeficiente de atrito transversal máximo para baixas velocidades de projeto como 0,16 (Figura 6), ajudando na prevenção de derrapagens em condições de pista molhada ou seca.

Esses parâmetros são vitais para a concepção de rodovias que minimizam riscos e maximizam a segurança dos usuários, especialmente em trechos que alternam entre retas longas e curvas fechadas.

Em resumo, a correta aplicação destes princípios de *design* rodoviário não só melhora a segurança como também contribui para a fluidez do tráfego, garantindo uma experiência de condução mais segura e agradável.

O estabelecimento da superelevação exige implantação de trecho que varia a declividade transversal, de forma suave, a evitar movimentos bruscos. Desta forma, há variação também do coeficiente de atrito transversal para que se ofereça a devida compensação centrípeta enquanto a curvatura horizontal apresentar variação.

Figura 6 – Valores de Coeficiente de Atrito Lateral em Função da Velocidade



Fonte: AASHTO (2001)

A superelevação máxima adotada em projetos de rodovias pode variar em função das condições climáticas e das diferenças significativas de velocidades entre veículos. Nas avenidas, onde a variação de velocidade é mais acentuada e os níveis de serviço são superiores aos das rodovias, recomenda-se valores máximos de superelevação reduzidos, como os 6% sugeridos por Pontes Filho (1998) para áreas urbanizadas. Em condições de congelamento de superfícies pavimentadas, a superelevação máxima recomendada deve ser inferior a 12% para garantir a segurança (AASHTO, 2018).

O coeficiente de atrito transversal entre pneu e pavimento é influenciado por diversos fatores, incluindo velocidade do veículo, pluviometria, pressão e tipo de pneus, regularidade do piso, além das outras características do pavimento. O sistema de suspensão do veículo também desempenha um papel crítico, em que os amortecedores ajudam a manter contato eficaz entre o pneu e o pavimento durante a frenagem e a aceleração (Viveros, 2010).

À medida que a velocidade aumenta, a tendência de movimento oscilatório vertical se intensifica devido à irregularidade do piso. Amortecedores são menos capazes de conter esse movimento em veículos com uma maior massa não suspensa (como rodas e pneus), o que pode alterar temporariamente as condições

de pressão dos pneus no solo e, conseqüentemente, a aderência. Veículos com menor massa não suspensa mantêm melhor o contato pneu-pavimento, proporcionando maior conforto aos ocupantes e eficácia na condução (Freitas, 2005).

O coeficiente de atrito lateral pode ser medido configurando um veículo para mover-se em um trajeto circular marcado em uma superfície horizontal, que neutraliza a aceleração centrípeta compensada. À medida que a velocidade aumenta o veículo eventualmente perde estabilidade, momento em que a aceleração centrípeta descompensada se iguala à aceleração centrípeta total, permitindo estimar o coeficiente de atrito transversal, segundo a Equação 3, válida para qualquer sistema coerente de unidades.

$$f_{t\max} = \frac{v_A^2}{g \times R} \quad (3)$$

Em que:

v_A : velocidade limite de aderência (m/s)

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

R : raio de curvatura horizontal (m)

$f_{t\max}$: coeficiente de atrito lateral máximo

Variações substanciais nos resultados do coeficiente de atrito são observadas, dependendo do nível de desgaste do pneu, da pressão, do tipo e da qualidade do piso, e das condições seca ou molhada da superfície. Por exemplo, em pavimento de concreto de cimento Portland com pneus novos, os valores variam entre 0,35 e 0,50 (AASHTO, 2001).

Essas variáveis críticas devem ser cuidadosamente consideradas no projeto de rodovias para garantir a segurança viária, adaptando-se às condições específicas de cada localidade e às características dos veículos que transitem pelo local.

O uso do coeficiente de atrito lateral para determinar o momento em que um pneu perde aderência, mesmo com a aplicação de um coeficiente de segurança, pode resultar em um projeto de estrada sem o entendimento adequado e controle do comportamento do veículo em curvas. A escolha de um raio de curva muito grande implica em restrições no desvio das interferências ao longo do alinhamento, enquanto um raio reduzido pode resultar em movimentos de alto risco para motoristas em velocidades superiores ao limite. Embora possa parecer contraditório

em relação aos limites de velocidade, é responsabilidade do projetista garantir a segurança, mesmo para condutores infratores.

Para evitar a escolha do raio de curva com base apenas no coeficiente de atrito lateral, recomenda-se determiná-lo para a velocidade segura na curva, que é aquela em que os ocupantes do veículo não experimentam desconforto. A abordagem de projeto baseada no coeficiente de atrito lateral máximo, garantindo o conforto dos ocupantes durante a curva, é apoiada pela AASHTO (2001).

Segundo o Federal Highway Administration (FHWA, 2011), as velocidades seguras para o motorista correspondem aos ângulos medidos no *Ball-Bank*³. O processo de determinação desses coeficientes de atrito e da velocidade segura é detalhado no [Apêndice C](#), enquanto os coeficientes estimados estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de Ângulos de *Ball-Bank*, Velocidades e Coeficientes de Atrito Lateral

<i>Ângulo lido no Ball-Bank (graus):</i>	<i>Velocidade máxima sem desconforto (km/h)</i>	Coeficiente de atrito lateral
14	32	0,21
12	40 a 48	0,18
10	56	0,15

Fonte: FHWA (2011)

Outro aspecto importante nas análises e projetos rodoviários é a distância de frenagem segura, que considera o tempo de percepção e o de reação do motorista, além do tempo necessário para frear, como se pode verificar através da Equação 4. O tempo médio de percepção e reação diante de um obstáculo pode ser estimado em 2,5 a 2,7 segundos em condições de tráfego reduzido (AASHTO, 2001, p. 50), conforme deduzido no [Apêndice D](#).

³ O Ball-Bank ou Indicador de Inclinação Lateral é um equipamento que consiste em um tubo ligeiramente curvo no qual uma bola permanece centralizada enquanto o avião está voando reto e nivelado ou enquanto o avião está fazendo uma curva adequadamente inclinada. Ele pode ser usado para determinar a velocidade máxima segura que um veículo pode percorrer confortavelmente em uma dada seção curva da estrada ([APÊNDICE C](#)).

$$D_F = 0,69 \times v + 0,0039 \times \frac{v^2}{f + i} \quad (4)$$

Em que:

D_f: distância de visibilidade de frenagem (m)

V: velocidade (km/h)

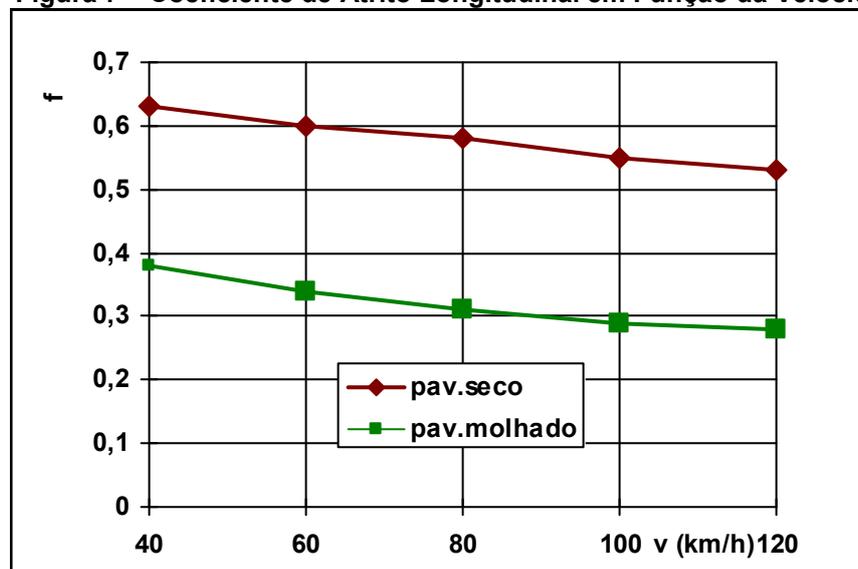
f: coeficiente de atrito longitudinal entre pavimento e pneumáticos

i: declividade longitudinal da rampa (m/m)

O aumento no tempo de frenagem geralmente reduz a eficiência do sistema, devido ao aquecimento. Durante a frenagem, os motoristas tendem a aumentar progressivamente a força aplicada no pedal, especialmente à medida em que se deseja evitar obstáculos que se tornam visualmente maiores quanto mais próximos estejam. Para estimativas práticas da distância total necessária em frenagens normais, o tempo de duração desta operação não é usualmente considerado. Este princípio não se aplica a frenagens prolongadas, como as realizadas ao longo de descidas longas, onde o superaquecimento pode levar à ineficiência e até mesmo a incêndios.

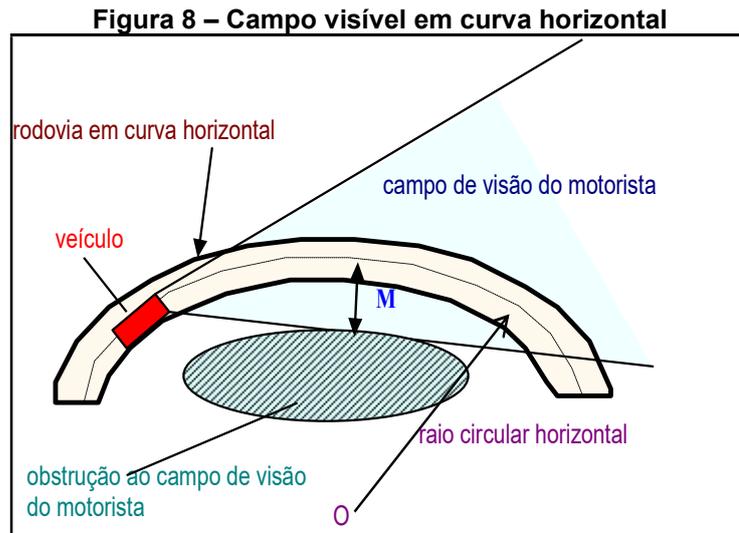
Os dados da Tabela 2 mostram que a média dos coeficientes de atrito transversal é de 0,18, que corresponde a 55% do coeficiente médio de atrito longitudinal para pavimentos secos, que é de 0,33. Esses valores são detalhados na Figura 7 para condições de piso seco e molhado, onde os coeficientes para piso molhado são aproximadamente metade dos valores para pavimentos secos.

Figura 7 – Coeficiente de Atrito Longitudinal em Função da Velocidade



Fonte: Prático (2018), adaptado pelo Autor.

Na análise da visibilidade em curvas horizontais, é comum calcular a distância visível à frente do motorista, assumindo que o veículo esteja no centro da via e que o limite do campo visual se estenda até a borda da estrada. Esta distância de visibilidade deve ser suficiente para permitir que o motorista freie e evite colisões com eventuais obstáculos detectados, conforme ilustrado na Figura 8.



Fonte: Do Autor (2003)

Para aferir essa distância de visibilidade, utiliza-se a flecha M , que é a distância vertical entre a corda, que representa o limite do campo de visibilidade, e o arco descrito pela trajetória do veículo na curva. A magnitude de M permite verificar se a visibilidade disponível é adequada para realizar frenagens seguras, ao comparar com o valor mínimo necessário, M_{\min} . Fatores como velocidade do veículo, distância de frenagem, raio da curva e presença de obstáculos no campo lateral influenciam nesta análise. A Equação 5, frequentemente usada em projetos rodoviários, expressa essas relações, e o [Apêndice E](#) detalha a dedução da equação de verificação da visibilidade.

$$M_{\min} = R_c \times \left[1 - \cos \left(\frac{D_F}{2 \times R_c} \right) \right] \quad (5)$$

Em que:

M_{\min} : flecha entre o arco e a corda de campo visível transversal ao eixo (m)

D_F : Distância de frenagem (m)

R_c : raio de concordância horizontal (m)

2.5.2 Exigências ao Projeto Geométrico de Rodovias

Os projetos de rodovias devem oferecer segurança, alta capacidade de tráfego e viabilidade técnico-econômica, o que exige a aderência a um conjunto de regras e restrições, que podem ser limites ou recomendações. Estas diretrizes devem possibilitar o alcance das metas estabelecidas, com seus elementos verificados conforme normas que vão do âmbito nacional ao local, alinhadas com práticas de resultados comprovados.

É essencial impor restrições operacionais aos veículos para assegurar um nível mínimo de segurança. No Brasil, os limites de peso e dimensões dos veículos que podem trafegar nas rodovias estão detalhados no Manual de Projetos de Rodovias do Brasil (DNER, 1999, p. 45) e na resolução 882 do CONTRAN (Brasil, 2021) alterada pela Resolução 994 do CONTRAN (Brasil, 2023).

Os significativos custos de construção de rodovias demandam critérios rigorosos para equilibrar o atendimento às demandas com a eficiência dos gastos. Por exemplo, o Governo do Estado do Paraná previu entregar 250 quilômetros de rodovias em 2022 ao custo de um bilhão e cem milhões de reais, o que corresponde a R\$ 4.400.000,00 por quilômetro (INFORME PARANÁ COOPERATIVO, 2022). No Estado do Rio Grande do Sul, os custos foram projetados em R\$ 1.490.541,34 por quilômetro de rodovia (Pedroso, 2001, p. 109), baseados em preços oficiais, para rodovias de médio a baixo tráfego.

Departamentos e concessionárias rodoviárias precisam avaliar projetos de construção ou melhoria de acordo com as normas vigentes, que incluem políticas técnicas e sociais. Estas normas também definem limitações como raios horizontais e inclinações.

O DNIT (2006) fornece uma ampla gama de orientações, condições e cálculos para o projeto rodoviário. As rodovias são classificadas em sete categorias, de acordo com o Quadro 1 e, em função do Nível de Serviço (NS), capacidade ou Volume Diário Médio (VDM), e controle de acesso. Rodovias de classe 0 têm maior capacidade e acessos controlados, minimizando riscos operacionais, enquanto as de classe IV têm capacidade reduzida e recursos financeiros mais limitados, procurando assegurar uma distribuição mais equitativa dos recursos por veículo, em termos de segurança e capacidade.

Quadro 1 – Classificação de Estradas Brasileiras - DNER

Classe	Nível de Serviço (NS) ou Demanda:
0 (zero)	NS=C; VDM \geq 5.500 terrenos planos ou ondulados NS=D; VDM \geq 2.600 – topografia montanhosa
I-A	Mesmos “NS”s da Classe “0” (classe zero) aceita maior congestionamento do que para a classe zero.
I-B	VDM \geq 1400, para o 10º ano de abertura ao tráfego Mínimo NS: C, para terreno montanhoso ou B, para terreno plano Máximo VDM para terreno plano: 5.500 (NS _{MAX} = C) Máximo VDM para terreno montanhoso: 2.600 (NS _{MAX} = D)
II	Adequado ao volume de tráfego previsto para o 10o ano da abertura: Mínimo VDM = 700; A<NS<D VDM<1400; A<NS<D
III	Adequado ao volume de tráfego previsto para o 10o ano da abertura: Mínimo VDM = 300; A<NS<D VDM<700; A<NS<D
IV-A	No ano de abertura: 50<VDM<200
IV-B	No ano de abertura: VDM<50

N.S.: nível de serviço; VDM: volume diário médio

Fonte: DNIT (2006)

A velocidade de projeto pode ser obtida pela Tabela 3 em função do tipo de topografia e classe da rodovia, segundo o DNIT (2006). Os raios de curvatura horizontal mínimos podem ser obtidos pela Tabela 4, para a velocidade de projeto e superelevação adotada (DNIT, 2006). Estes valores consideram critérios de estabilidade e visibilidade em curvas, conforme a AASHTO (2018, p. 2-24). Também são calculadas as distâncias de segurança necessárias, como aquelas para manutenção entre veículos na mesma faixa e para ultrapassagens, particularmente em rodovias de mão dupla e simples.

Tabela 3 – Velocidade de Projeto (km/h)

Topografia: Classe da Rodovia:	Plana:	Ondulada:	Montanhosa:
0 (zero)	120	100	80
I	100	80	60
II	100	70	50
III	80	60	40
IV	80-60	60-40	40-30

Fonte: DNIT (2006)

Tabela 4 – Mínimos Raios Horizontais (m)

Vel. De Projeto (km/h) Superelevação(%)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
4	30	60	100	150	205	280	355	465	595	755
6	25	55	90	135	185	250	320	415	530	665
8	25	50	80	125	170	230	290	375	475	595
10	25	75	75	115	155	210	265	345	435	540
12	20	70	70	105	145	195	245	315	400	490

Fonte: DNIT (2006)

O desenho do perfil longitudinal, detalhado no [Apêndice F](#), deve levar em conta as limitações de declividades máximas e mínimas das tangentes verticais, considerando fatores como segurança operacional, fluidez de tráfego e eficiência das drenagens superficial e subsuperficial. Os limites de declividades, bem como a largura e o número de faixas, são ajustados de acordo com a classe da rodovia e a topografia do terreno. As declividades máximas são apresentadas na Tabela 5 do DNER (1999). Ademais, as curvas verticais são projetadas considerando o campo de visão do motorista, com base na altura dos olhos do condutor e na altura de um obstáculo padrão.

Os valores limites de projeto das Normas Brasileiras de Projetos Rodoviários foram concebidos principalmente no âmbito da Física Aplicada (DNIT, 2006). Por exemplo, à medida que se estabeleçam maiores velocidades de projeto, o raio horizontal mínimo também aumenta, com base científica.

A relação entre o tipo de terreno e a classe de estrada é relevante para determinar a velocidade de projeto. Observa-se que, devido à topografia, as velocidades de projeto são frequentemente reduzidas para controlar custos construtivos ao invés de focar prioritariamente na segurança viária. Isso ocorre apesar da tendência dos motoristas de manter a velocidade mesmo com mudanças na topografia ou sinalização clara. Na prática, quanto mais íngreme o terreno, mais permissivas tornam-se as declividades longitudinais máximas, buscando um equilíbrio entre questões técnicas, viabilidade financeira e capacidade viária. As sequências numéricas de valores limites exibem uma tendência linear, que pode ser criticada por não possuírem uma inter-relação sob uma ótica científica rigorosa. Uma abordagem para aprimorar a definição de valores limites poderia incluir análises baseadas em índices de acidentes.

Tabela 5 – Máximas Declividades de Tangentes Verticais (%)

Topografia: Rodovia:	<i>Plana:</i>	<i>Ondulada:</i>	Montanhosa:
0 (zero)	3	4	5
I	3	4,5	6
II	3	5	7
III	4	6	8
IV-A	4	6	8
IV-B	6	8	10 (rampa<300m)

Fonte: DNIT (2006)

As curvas de raio variável são projetadas para que o traçado veicular siga o eixo da faixa, com os motoristas ajustando a direção para gerar a força centrípeta necessária para manter os veículos em posição central em relação à faixa de tráfego, conforme discutido no [Apêndice G](#).

Entre curvas horizontais reversas deve se estabelecer tangente de extensão mínima, para suavizar a transição de superelevação que gera declividade transversal voltada para um lado da plataforma, que se alterna para o outro (Braz, 1994).

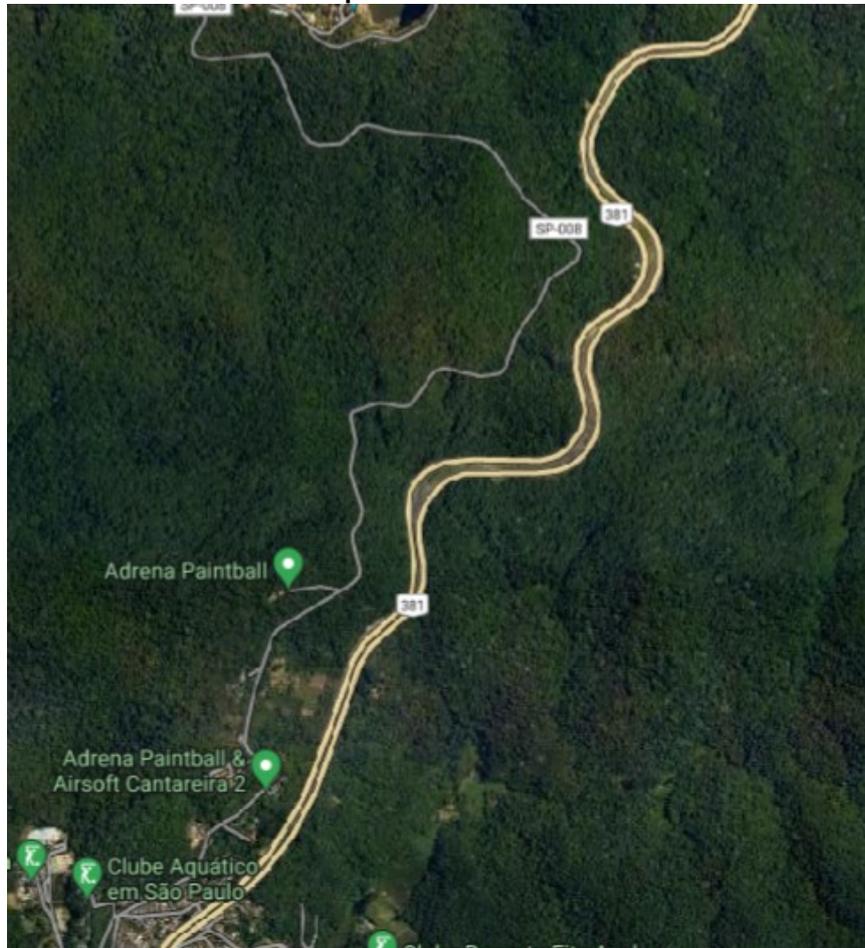
À medida que a demanda de tráfego aumenta, as rodovias devem ser reclassificadas, para garantir um nível adequado de segurança e conforto, acarretando requisitos mais rigorosos, fato que geraria possíveis imposições de projetos de melhoria. Como exemplo, pode-se imaginar uma rodovia de pista simples e de mão dupla, classificada como de reduzida demanda e capacidade à época de seu projeto, e que sofreu elevação considerável de demanda ao longo dos anos. A duplicação da via pode ser a solução ideal, com as magnitudes limitantes relativas à nova classificação. A Rodovia Fernão Dias, BR 381, entre Belo Horizonte e São Paulo, foi entregue ao tráfego em 1961 e foi duplicada nos anos 1990 com pista lateral à existente, mantendo declividades e raios da pista antiga. Na Figura 9 apresenta-se trecho desta rodovia duplicada, entre os municípios de Mairiporã e São Paulo. Entre 1960 e 1995, a frota nacional aumentou quase 55 vezes, de acordo com o Quadro 1, fato que indica aumento de demanda generalizado, em magnitude suficiente para que se possa concluir que a rodovia deveria ter sido implantada de forma a atender as premissas de classe superior, visando minimizar riscos e maximizar conforto. Estas premissas normalmente acarretam raios mínimos maiores bem como rampas máximas menores.

As restrições financeiras têm considerável influência quanto aos custos de desapropriação, minimização do alto custo de obras de arte especiais típicas em região montanhosa, em paralelo às leis ambientais que tendem à justificativa da não efetivação de vias melhores, por estarem em região de forte restrição de ocupação de áreas lindeiras.

Quanto às obras públicas, há ainda o contingenciamento de custos e recursos conhecidos como “carimbados”, montantes que têm especificidade única de uso no arcabouço legal brasileiro, e engessam orçamentos. Almeida (2004) destaca a questão econômica na duplicação da Fernão Dias, com análise do investimento pelo

Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) segundo custos operacionais por veículo, dentre outros fatores.

Figura 9 – Trecho da BR 381 Duplicada em Mesma Geometria da Pista Original



Fonte: Google Earth (2023)

Rodovias antigas, sobrecarregadas devido ao tráfego intenso e projetadas para uma capacidade reduzida, devem ser avaliadas quanto à sua obsolescência. Elas podem permanecer em uso com perfil de acessibilidade e deslocamentos locais, desde que haja a oferta de uma nova rodovia com geometria adequada a um alto volume de tráfego, atendendo às demandas atuais e preparada para futuros níveis mais elevados de fluxo. Uma classificação de risco baseada na geometria e nos dados de acidentes contribuiria para uma análise mais objetiva e forneceria justificativa para a liberação de maiores volumes financeiros, compatíveis com a demanda atual.

O excesso de velocidade deve ser considerado nas análises de projeto ou na melhoria das condições de uma via existente. A fiscalização da velocidade, por ser

pontual, não elimina por completo essa prática. Motoristas se sentem "seguros" ao exceder a velocidade permitida devido à facilidade de obter informações sobre a localização de radares e fiscalizações pela *internet*, além da crença de conhecer os pontos críticos ao longo da via.

As soluções atenuadoras de velocidade (*Traffic Calming*) visam reduzir a velocidade em determinados pontos ou trechos de vias, sejam urbanas ou rurais, de forma a diminuir os índices de acidentes, evitando reações dos motoristas que poderiam gerar outros tipos de risco operacional. Essas soluções devem ser associadas a aspectos ambientais relevantes, incluindo questões externas ao veículo, que apresentam um potencial maior para gerar acidentes (Esteves, 2003).

2.5.3 Aceleração Centrípeta Descompensada

A aceleração centrípeta necessária para que um veículo realize um movimento circular é a soma das parcelas associadas à superelevação e ao coeficiente de atrito lateral. A aceleração centrípeta compensada e a descompensada somam-se para igualar a aceleração centrípeta total, conforme ilustrado nas Equações 1 e 6.

Quando o motorista percebe que está saindo do centro da faixa de tráfego, começa a girar o volante, ajustando a direção durante a transição entre um traçado retilíneo e outro curvilíneo. Enquanto gira-se o volante, aumenta-se, proporcionalmente, a aceleração centrípeta descompensada.

Quanto maior a velocidade e menores o raio da curva e a superelevação, maior deve ser o coeficiente de atrito lateral para manter o veículo na curva, conforme a Equação 6, válida para qualquer sistema coerente de unidades.

$$f_t \times g + g \times e = \frac{v^2}{R} \Rightarrow f_t = \frac{v^2}{g \times R} - e \quad (6)$$

Em que:

$g \times f_t$: aceleração centrípeta descompensada (m/s^2)

v : velocidade (m/s)

R : raio da curva (m)

$g \times e$: aceleração centrípeta compensada pela superelevação (m/s^2)

Portanto, é essencial que os projetos rodoviários considerem cuidadosamente os parâmetros de velocidade, raio e superelevação para evitar acidentes acarretados por magnitude excessiva da aceleração centrípeta descompensada.

A Equação 7 indica o coeficiente de atrito necessário ($f_{t nec}$) para que o veículo consiga se manter no eixo rodoviário. Este valor de f_t é função da máxima superelevação para um dado raio horizontal e determinada velocidade. Os valores de coeficientes de atrito lateral, presentes na Figura 6, foram calculados considerando limites de segurança e, quando comparados aos valores necessários, de acordo com a Equação 7, válida para qualquer sistema coerente de unidades, permitem inferir a ampla dispersão de esforços laterais em diferentes curvas.

$$f_{t nec} = \frac{v^2}{g \times R} - e_{max} \quad (7)$$

Em que:

$f_{t nec}$: coeficiente de atrito transversal necessário

v: velocidade (m/s)

R: raio da curva (m)

g: aceleração da gravidade (m/s²)

e_{max} : superelevação máxima

2.5.4 Processos de Seleção da Superelevação

Em função da ampla gama de valores de superelevação e de fatores influentes, diferentes pesquisadores desenvolveram distintos processos de estabelecimento de valores para cada raio de curvatura.

Estes processos dependem da magnitude dos máximos valores de superelevação. O Quadro 2 apresenta os valores limitantes para rodovias brasileiras (DNIT, 2006).

Os valores máximos de superelevação indicados pela AASHTO (2001, p. 141) dependem das condições climáticas, da topografia, do tipo de área (rural ou urbana) e da influência do tráfego de veículos lentos, o que justifica a impossibilidade de se estabelecer um valor máximo único. A superelevação de 8% é indicada para áreas sujeitas à neve, devido ao coeficiente de atrito reduzido, variando entre 0,05 e 0,40 para superfícies com gelo. Em geral, a AASHTO (2001) recomenda 10% como máximo, exceto para áreas com baixo volume de tráfego, onde o limite superior é de 12%.

Quadro 2 – Máximas Superelevações para Rodovias Brasileiras

e_{max} (%)	Indicação:	Observações:	Contra indicação:
4	Situações extremas	Intensa ocupação do solo lindeiro e reduzida flexibilidade de variações transversais	Local sem vias marginais
6	Região urbana	Local de frequentes interseções com redução de velocidade média.	
8	Classe I ou inferiores, em regiões montanhosas	Rodovias de padrão intermediário ou de alto padrão, em locais onde ocorra redução de velocidade média.	
10	Para rodovias Classe 0 (zero) ou Classe I de regiões planas.	Para rodovias de alto padrão, geometria de alta qualidade e altas velocidades permitidas, com fluxo ininterrupto.	
12	Apenas para projetos de melhoria sob forte restrição financeira e condição de risco.	Preferível aumento de raio do que a aplicação de 12%	Ocorrência de incidência de veículos lentos

Fonte: DNIT (2006, p. 98)

Embora camadas de gelo na pista não sejam comuns no Brasil, uma fina camada de lama não deve ser ignorada, pois seu coeficiente de atrito é semelhante ao do pavimento com gelo superficial. A gravidade de acidente em pistas com lama é confirmada por ações judiciais de indenização, como as registradas junto ao Tribunal de Justiça do Estado do Paraná (Brasil, 2015).

O valor da superelevação a ser adotado não precisa, necessariamente, ser o valor máximo. Existem métodos distintos para selecionar valores que complementem as questões de equilíbrio de movimento. Segundo a AASHTO (2001, p. 138), os valores de superelevação podem ser obtidos em função da curvatura, como apresentados na Figura 10, conforme os métodos a seguir.

A. Superelevação Compensando toda a aceleração centrípeta:

A superelevação a ser adotada é diretamente proporcional à curvatura (inverso do raio), de forma a compensar todo o esforço, com aceleração centrípeta descompensada nula, até que se atinja a máxima magnitude da superelevação. Neste ponto, a curvatura é igual a $1/r'$, tal como indicado na Figura 10. Por este processo, a superelevação é igual à máxima magnitude para todas as curvas de raios inferiores, até que se atinja a curvatura máxima. A estimativa considera velocidade menor que a de projeto.

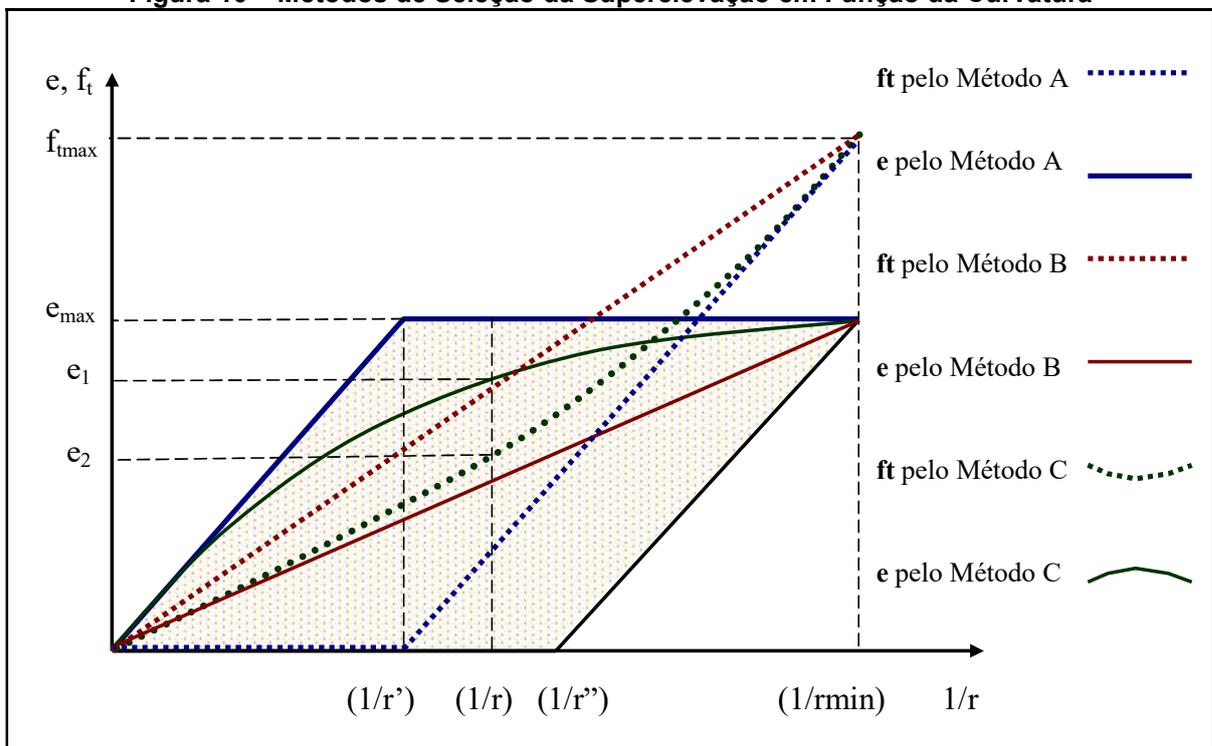
B. Superelevação Diretamente Proporcional à Curvatura:

A superelevação indicada é diretamente proporcional à curvatura, com o coeficiente de atrito transversal progredindo também de forma diretamente proporcional à curvatura, até que se atinja a curvatura máxima, igual a $1/r_{\min}$, tal como indicado na Figura 10. Oferece ao motorista praticamente a mesma força ao girar o volante em qualquer curva. As superelevações calculadas por este método são significativamente menores do que no Método A, principalmente para raios intermediários, e tendem a ser predominantes ao longo da rodovia.

C. Relação Não Linear:

Neste método, as superelevações se encontram entre os valores dos Métodos A e B, aparentemente oferecendo a melhor solução. No entanto, o coeficiente de atrito também varia de forma não linear, aumentando em taxas mais elevadas para raios menores.

Figura 10 – Métodos de Seleção da Superelevação em Função da Curvatura



Fonte: AASHTO (2001), adaptado pelo Autor.

2.5.5 Avaliação de Aceleração Centrípeta Descompensada

Devem ser considerados os seguintes passos para se avaliar a aceleração centrípeta descompensada: identificar as curvas críticas com base na geometria e nos dados de acidentes históricos, calcular o coeficiente de atrito necessário ($f_{t_{nec}}$) segundo a Equação 7, comparar os valores de $f_{t_{nec}}$ com os valores reais citados na Figura 10 e classificar as curvas de risco segundo os dados de acidentes e coeficientes de atrito necessários. Deve-se propor uma estratégia de atenuação de velocidade segundo soluções ativas, com radares, fiscalização e sinalização; e soluções passivas, na forma de alterações geométricas, implantação de superelevação adequada e pavimentos com aderência suficiente para determinadas faixas de velocidade.

A aceleração centrípeta descompensada é influenciada pelos seguintes fatores, principalmente: raio de curvatura, superelevação, velocidade de operação, ambiente, classe da rodovia e método de seleção da superelevação. Quanto menores os raios das curvas horizontais, maior a exigência da aceleração centrípeta. A superelevação, quando de magnitude inadequada pode acarretar necessidade de maior aceleração centrípeta descompensada, levando o veículo a uma condição mais próxima do limite de aderência. Velocidades de operação elevadas ampliam o risco de perda de controle veicular quando se atingem curvas mais fechadas. O ambiente, em termos de topografia e clima, pode gerar condições operacionais adversas, na forma de chuva, neve ou lama, reduzindo o coeficiente de atrito e aumentando a dificuldade de manter o veículo na faixa de tráfego. A classe da rodovia é parâmetro de classificação no projeto ou na melhoria da via, contudo, o aumento de tráfego, sem que melhorias sejam executadas, indica incompatibilidade entre tráfego e as exigências de norma, reduzindo a segurança operacional. A escolha de determinado método de seleção de superelevação pode gerar discrepâncias entre a abordagem considerada e a realidade prática do movimento veicular.

A aceleração centrípeta descompensada pode também ser mitigada ou reduzida, além dos fatores citados, com a instalação de dispositivos atenuadores de velocidade, como pavimentos texturizados, estreitamento de pista para impor restrição visual com conseqüente desaceleração, a até lombadas, que devem ser instaladas com rigor tecnológico e dependendo da classe da via.

A prática de velocidades superiores ao limite permitido, combinada com a condução por “experiência”, pode levar a erros de julgamento por parte dos motoristas, resultando em acidentes. Um projeto cuidadoso deve levar em consideração as velocidades operacionais reais, que, muitas vezes, ultrapassam a velocidade permitida.

A compreensão e mitigação da aceleração centrípeta descompensada é fundamental para a segurança rodoviária. Projetos rodoviários devem considerar cuidadosamente os fatores que influenciam esta aceleração, implementando soluções ativas e passivas para minimizar os índices de acidentes e sua gravidade.

2.6 Correlações e Fatores Influentes Entre Geometria e Acidentes

A segurança rodoviária é uma necessidade fundamental no contexto rodoviário, mesmo no atual nível tecnológico, devido ao fato de que as estatísticas de lesões ou mortes ainda são elevadas em todo o mundo.

Para se estudar a segurança nos transportes, em particular no modo rodoviário, deve-se concentrar estudos e pesquisas no trinômio Homem, Veículo e Via, tendo como foco a segurança antropológica.

A geometria da via pode impor movimento aos veículos, que tende a gerar acidentes, em caso de, por exemplo, uso da via em velocidade superior à permitida. A velocidade máxima que o ser humano atinge com seus pés é muito menor que a velocidade praticada na maioria dos sistemas de transporte, tanto a máxima quanto a média. Dessa forma, sua compleição física não é adequada para dissipar a grande quantidade de energia em frações de segundo, tempo em que ocorrem as deformações veiculares e a transferência da energia residual para os ocupantes no caso de uma colisão. Isso tende a resultar em morte ou incapacidade física permanente, sendo que a ausência de dispositivos ou equipamentos de proteção agrava o risco. Assim, apesar da oferta de rapidez e conforto no transporte, premissas que nortearam projetos veiculares desde seu início, deixaram de ser prioritárias. O curto intervalo de tempo em que a energia do impacto é dissipada ou transferida quando de colisões a altas velocidades tornou-se fator determinante na análise de segurança veicular, em função da influência na segurança dos ocupantes.

2.6.1 Leis restritivas à má condução rodoviária

Há considerável montante de leis e normas, tanto nacionais quanto mundiais, para que se evite ou se restrinja ao máximo o uso indevido da via, por condução inadequada. Para exemplificar a priorização ao ser humano, estabeleceu-se no Reino Unido um seguro compulsório contra terceiros no transporte rodoviário, contra lesões pessoais e danos materiais gerados em acidentes neste modo, pelo *Road Traffic Act* de 1930 (ENCYCLOPEDIA, 1964, p. 894).

Nos EUA, em 1966, foi assinada a Lei de Segurança Nacional de Tráfego e Veículos Automotores (*National Traffic and Motor Vehicle Safety Act*) (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2017). Na evolução legal da segurança viária, foi criada em 1982 uma comissão para estudar o problema de beber e dirigir. Em 1984, foram promulgadas as primeiras leis sobre o uso do cinto de segurança, e, em 1993, surgiram as primeiras normas para a qualificação de carros sob a ótica da segurança.

No Brasil, a obrigatoriedade da instalação de cintos de segurança nos veículos rodoviários decorre de uma lei de 1971, mas a obrigatoriedade de seu uso em rodovias foi estabelecida apenas em 1989, após a quarta tentativa, quando questões jurídicas foram "contornadas", segundo Silva (1989). Na época, juristas e figuras públicas opuseram-se à obrigatoriedade, argumentando que o Estado não poderia impor o uso do cinto por ser um direito do cidadão não usá-lo, embora concordassem com a importância do cinto para a segurança, segundo Alencar (1989).

A obrigatoriedade foi inicialmente aplicada apenas para rodovias e não para vias urbanas, onde nestas últimas o cinto de segurança apresenta melhor resposta, pelo fato de que o cinto de segurança tem eficiência de reduzida a nula sob velocidades muito altas. A lei focou na aceitação pública, pois os leigos consideravam o cinto mais importante nas rodovias do que nas vias urbanas.

A Lei Federal 11.705/2008, conhecida como "Lei Seca", foi concebida de forma binária, considerando o motorista alcoolizado ou não (Aranda, 2008), para facilitar a fiscalização. Isso contrasta com a concentração de álcool no sangue (CAS) de 0,05 g/dl, que, cientificamente, se traduz como um limiar de transição entre o estado de alcoolemia sem impacto mensurável e aquele que inicia a influência na qualidade da condução (GLOBAL ROAD SAFETY PARTNERSHIP, 2015). A lei foi

projetada para facilitar a compreensão da imposição, e não sob uma perspectiva científica.

2.6.2 Evolução da normatização de projeto de rodovias

Quanto ao fator via, os primeiros melhoramentos rodoviários foram estabelecidos para atender ao tráfego, quanto à regularidade e à qualidade da superfície rodante. Wright e Paquette (1987, p. 2) citam as ruas da Babilônia, pavimentadas em 2000 a.C., época em que técnicas de execução de pavimentos em camadas de pedras passaram a ser utilizadas. No final do século XVIII, o engenheiro Trésaguet defendia técnicas construtivas utilizando camadas de pedras cobertas por outras de menor diâmetro, aperfeiçoadas posteriormente por John L. McAdam e Thomas Telford. Em 1806, o governo dos EUA iniciou incentivos à construção rodoviária, mas apenas em 1968 houve uma citação expressa sobre segurança rodoviária no *Federal-Aid Highway Act* (Wright; Paquette, 1987, pp. 3, 9). No Brasil, o Decreto-Lei 512 de 1969, no capítulo 4º, inciso II, instituiu uma taxa para melhorar a segurança das estradas federais, conforme a Lei nº 5391 de 23/2/1968 (Brasil, 1969).

As normas de projeto de rodovias foram desenvolvidas sob distintas premissas, sem um foco claro em níveis de risco específicos. De acordo com o Relatório 480 do Programa Nacional de Cooperação em Pesquisas de Autoestradas (National Cooperative Highway Research Program, 2002, p. 68), o projeto de autoestradas baseado no desempenho deve considerar fatores fundamentais como: o processo de tomada de decisões, valores comunitários das áreas de atendimento, questões ambientais, segurança e praticabilidade. Nesta abordagem, a segurança não é tratada como prioritária. O relatório destaca questões ambientais, mas não enfatiza que os aspectos antropológicos também são pertinentes.

Normas de projeto rodoviário adotadas no passado não garantiam necessariamente relações claras entre limites físicos da via e risco operacional. Segundo Hauer (2000), da Universidade de Toronto, procedimentos comuns de projeto, como a distância de visibilidade mínima em curvas verticais, baseiam-se em suposições sobre velocidade, altura do objeto e modelos de cálculo sem qualquer

relação com a taxa de risco viário. A velocidade de projeto, uma vez definida, dificilmente se torna confiável, pois muitos motoristas não a respeitam.

O estado da arte ainda exige a evolução de condições de projeto com base em relações de risco e valores-limites. Por exemplo, a declividade máxima de rodovias deve estar associada a um nível de risco específico, assim como o comprimento mínimo de curvas verticais deve estar associado à distância de visibilidade, grandeza associada também a risco operacional.

As grandezas físicas geométricas das rodovias como declividade e extensão de tangentes longitudinais precedentes às curvas horizontais, raios de curvatura horizontais e superelevações correspondentes, devem ser analisadas em relação à influência na ocorrência de acidentes. Há também grandezas abstratas que devem compor esses estudos, como velocidade veicular, acelerações centrípeta e longitudinal, e coeficientes de atrito estabelecidos para diferentes casos que considerem a anisotropia no plano de contato entre pneus e pavimento, bem como distintos modelos de cálculo de interação entre estes fatores.

Nos métodos e procedimentos de projeto usuais, a análise conjunta dessas grandezas não exige levar em conta outras grandezas físicas que são correlacionáveis ao contato pneu e pavimento, como a regularidade superficial do piso e sinalizações horizontal e vertical, visando estudos quanto à influência da geometria na geração de acidentes. O coeficiente de atrito, associado à aceleração centrípeta descompensada, deve ser incluído nesses estudos, ao se avaliar a influência da aceleração centrípeta descompensada nos índices de acidentes e severidade.

2.6.3 Correlações entre acidentes e geometria rodoviária

Sob uma perspectiva estatística, acidentes de alta severidade, com morte e lesões graves, são raros em comparação com acidentes sem vítimas. Análises da influência da geometria na segurança devem buscar dissociar tipos e níveis distintos de acidentes para obter maiores coeficientes de determinação nas correlações matemáticas, dado o caráter praticamente randômico de sinistros sem vítimas. Além disso, deve-se associar o número de acidentes ao volume de tráfego para que seja

possível analisar trechos distintos de vias, considerando a maior incidência de acidentes em função do volume de tráfego.

Locais com maior concentração de acidentes caracterizam os denominados *black spots*, de acordo com Lamm, Psarianos e Mailaender (1999, p. 18.1). Uma vez definidos esses pontos, impõem-se análises dos possíveis motivos para efetuar melhorias que minimizem ou mitiguem a concentração de acidentes. No entanto, essa técnica indica que ações de melhoria só serão efetivadas se houver alta letalidade ou elevado volume de lesões.

Peixoto e Paiva (2011, pp. 96-98) defendem a Auditoria de Segurança Viária, onde métodos de auscultação podem ser estabelecidos para avaliar o grau de periculosidade do trecho rodoviário antes que ocorra uma concentração de graves acidentes, com base em comparação com trechos semelhantes e bancos de dados dos elementos da rodovia e acidentes.

Para a devida avaliação da concentração de acidentes e seus tipos, deve-se determinar o índice de acidentes de acordo com a Equação 8, que apresenta um formato clássico de associação entre eventos, intervalo de tempo, extensão e volume de tráfego (Ferreira, Justo-Silva; 2018). A estrutura da Equação 8 indica o Índice de Acidentes (IA), que pode ser alterado para Índice de Feridos (IF), substituindo o número de acidentes pelo número de feridos, ou para Índice de Mortos (IM), substituindo o numerador pelo número de mortos.

$$IA = \frac{n}{VDM \times 365 \times N \times L} \quad (8)$$

Em que:

IA: índice de acidentes

n: número de eventos

VDM: volume diário médio

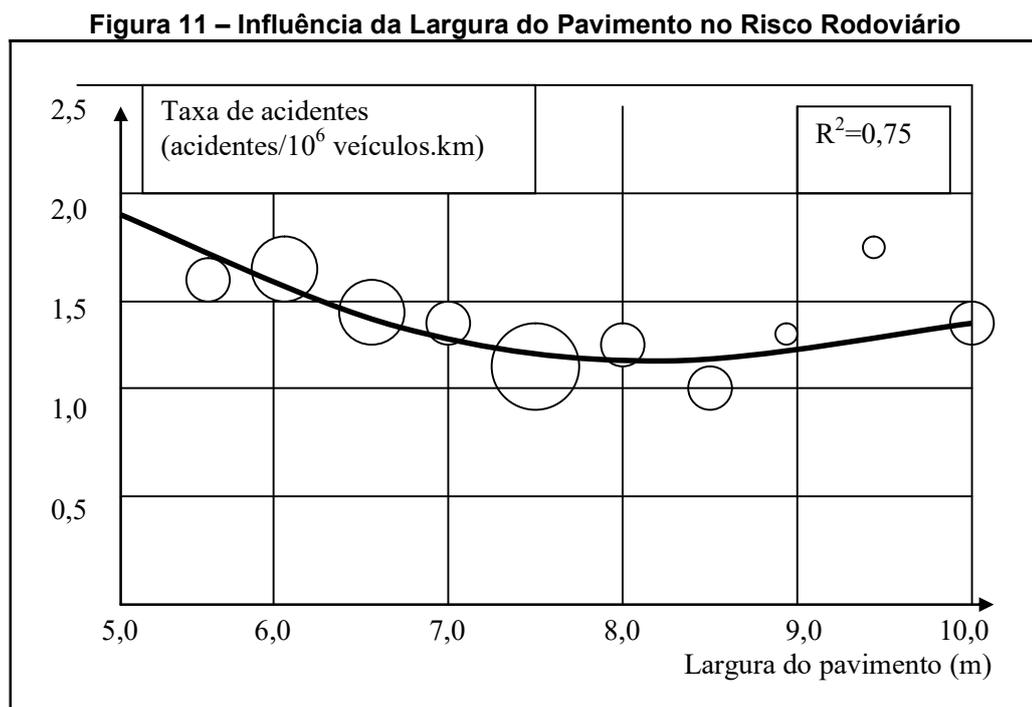
N: número de anos

L: extensão pesquisada (km)

A análise das correlações entre geometria e acidentes é fundamental para melhorar a segurança rodoviária. A identificação de fatores geométricos, como raio horizontal, superelevação e declividade, que influenciam na ocorrência de acidentes, permite o desenvolvimento de soluções mais eficazes para mitigar os riscos. A compreensão estatística dessas correlações fornece um embasamento sólido para

intervenções de segurança e aprimoramento das normas de projeto. A seguir, exemplifica-se correlações de grandezas físicas da via com acidentes.

Abboud e Bowman (2001) conceberam um estudo que indica maior risco operacional à medida que a largura da faixa de tráfego aumenta, indicando que a ideia de que o aumento da largura da faixa torna a via mais segura é questionável. Por outro lado, a pesquisa de Leutzbach e Zoellmer (1989) resultou em um gráfico que mostra a influência da largura do pavimento no risco rodoviário. Foram pesquisados 1.500 km de rodovias de duas faixas de tráfego na Alemanha, cujos dados de tráfego datam de 1978 a 1985. O resultado da análise indica um risco mínimo para uma largura de 8,0 m, conforme mostrado na Figura 11. Destaca-se que esta abordagem não faz parte das grandezas pretendidas para estudo neste trabalho.



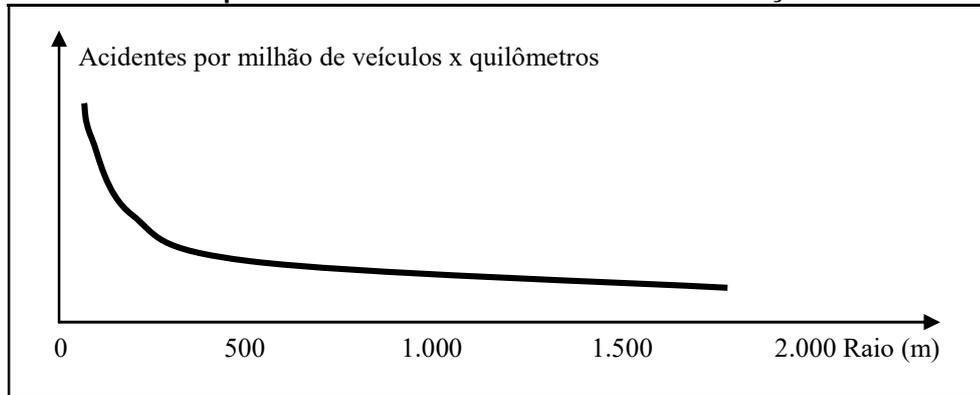
Fonte: Leutzbach e Zoellmer (1989).

Larguras de faixa de tráfego inferiores a 3,25 m e acostamentos ausentes ou ainda estreitos tendem a gerar aumento do risco de acidentes, em função da menor folga lateral entre linhas divisórias de faixas.

O raio de curva horizontal, por sua vez, é um dos fatores fundamentais no estudo da influência da geometria na geração de acidentes. A relação inversa com a aceleração centrípeta indica um potencial de instabilidade dos veículos sob altas

velocidades. Hauer (1999) estabeleceu relação entre esses elementos, onde raios maiores que 500 m indicam reduzida influência na geração desses eventos, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Acidentes por Milhão de Veículos-Quilômetro em Função do Raio Horizontal



Fonte: Hauer (1999)

Motoristas tendem a manter o veículo em velocidade constante, mesmo quando sob magnitude excessiva, fortemente influenciados por questões sensoriais. Em trechos com raios horizontais reduzidos, veículos sob velocidades superiores às permitidas apresentam insuficiente extensão de campo visual à frente, podendo acarretar sensação de excesso de velocidade, mas de forma não necessariamente compatível com o nível de segurança adequada.

Contudo, em rodovias de elevada velocidade de projeto, onde os raios horizontais são de grande magnitude, o campo visual mais amplo tende a oferecer sensação de segurança mesmo sob elevada velocidade, gerando outro tipo de cenário de risco. A sensação de risco está associada a esforços sobre os ocupantes e não em função da visibilidade, quando o excesso de forças do veículo sobre os corpos dos ocupantes tende a oferecer alguma restrição no modo de condução.

O cenário de risco operacional em rodovias com raios e tangentes de grande magnitude se apresenta como relativamente constante e de baixa concentração de sinistros, com menos de meio acidente por milhão de veículos multiplicados por quilômetro em quase todas as pesquisas de Matthews e Barnes (1988), conforme apresentado no Quadro 3. A máxima incidência de acidentes, 0,77; ocorre para extensão de tangentes 1.125 m e raio 4.489 m; e a menor, 0,05; para tangente de 8.800 m e raio 4.489 m.

Quadro 3 – Correlações entre Raios, Tangentes Precedentes e Risco Viário

		Acidentes por milhão de veículos x quilômetros								
R(m)↓	L (m)→	225	775	1.125	1.175	3.300	5.500	8.800	11.200	Média:
	1.126	0,33	0,36	0,48	0,41	0,53	0,25	0,55	0,64	0,44
	2.286	0,15	0,21	0,20	0,26	0,23	0,20	0,23	0,31	0,22
	4.489	0,22	0,17	0,77	0,22	0,11	0,21	0,05	0,17	0,24
	8.812	0,21	0,07	0,12	0,06	0,15	0,12	0,08	0,10	0,11
média:		0,22	0,20	0,39	0,24	0,26	0,20	0,23	0,31	

R: raio de curvatura horizontal

L: extensão da tangente precedente ao raio

Fonte: Matthews e Barnes (1988), adaptado pelo Autor.

Segundo o Quadro 3, a média de acidentes por milhão de veículos x quilômetro para o menor raio estudado aumenta com certa regularidade, para as maiores extensões de tangentes, indicando possível influência de fatores humanos em tangentes que não obriguem virar a direção bem como a possibilidade de ocorrência de velocidades excessivas. Não há evidência de risco operacional excessivo em todas as faixas de raios e extensões pesquisadas, quanto à interação entre tangente precedente e raio.

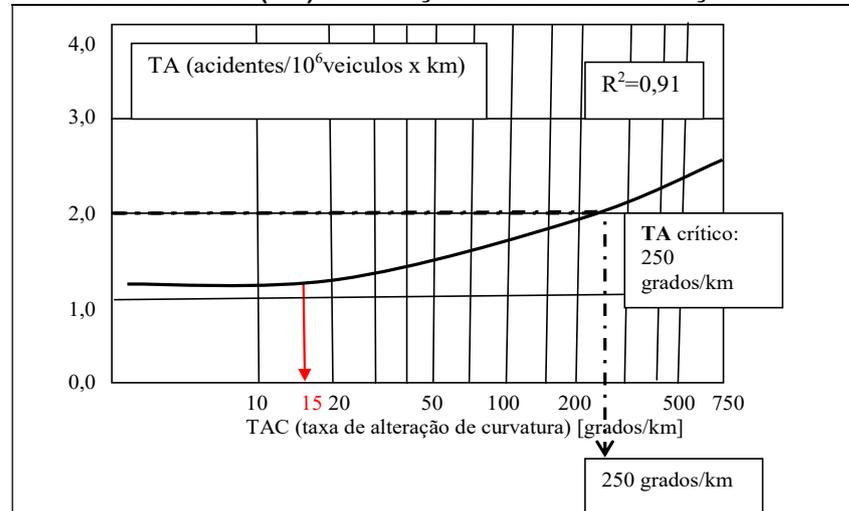
A segurança pode ser aprimorada através da sinalização adequada, visando redução gradual da velocidade nas tangentes e melhoria da geometria rodoviária, como a implementação de raios maiores ou superelevação adequada.

Outros parâmetros rodoviários foram pesquisados, de forma isolada, por Lamm e Choueiri (1987), associando-os a determinados limites de índices de acidentes. Foram analisados os seguintes parâmetros e suas taxas de acidentes: grau e extensão da curva horizontal, superelevação, declividades longitudinais limitadas a 6% (valor máximo usual para projetos), distância de visibilidade, larguras de faixa de tráfego e acostamento, volume médio diário anual de tráfego e velocidade de operação. Os dados foram coletados ao longo de um período de 4 anos, totalizando 14.200 acidentes. O universo das amostras era de pistas simples de duas faixas, num total pesquisado de 1.162 km no oeste da Alemanha. As Figuras 13 a 16 apresentam os gráficos resultantes, com os coeficientes de determinação entre as grandezas analisadas, todos superiores a 0,9.

Lamm (1980) determinou a taxa máxima de alteração de curvatura para um limite adotado de 2 acidentes por milhão de veículos-quilômetro, obtendo um valor de 250 graus/km (ou 225°/km de rodovia), como mostrado na Figura 13. Com esta

taxa de acidentes como limite, foram desenvolvidos estudos de valores limites de outras grandezas influentes.

Figura 13 – Taxa de Acidentes (AR) em Função da Taxa de Alteração de Curvatura



Fonte: adaptado de: Lamm e Choueiri (1987)

Segundo a Figura 13, o grau das curvas horizontais e a extensão de seus desenvolvimentos apresentam elevada correlação positiva com a taxa de acidentes. Curvas acentuadas e de elevada extensão apresentam maior influência nos índices de acidentes. A taxa de Alteração de Curvatura de 250 graus/km (225°/km de rodovia) pode ser utilizada como referência para projetos geométricos que buscam aumentar a segurança rodoviária. Valores inferiores a 15 graus/km indicam prática nulidade de influência com o índice de acidentes. Este limite de acidentes corresponde ao nível de segurança de 99,9998% de chance de um acidente não ocorrer, que se estima com a diferença entre a totalidade do universo de dados, igual à unidade, relativa as viagens associadas à distância (veículos x quilômetro) e dois milionésimos destes eventos sofrendo acidentes, correspondente ao valor expresso na Equação 9.

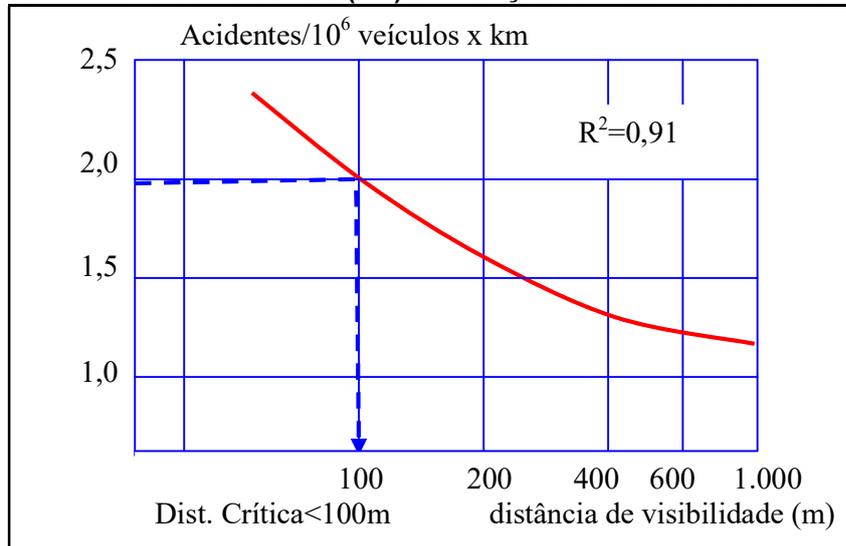
$$P = 1 - (2 \times 10^{-6}) = 0,999998 \quad (9)$$

P : probabilidade de ocorrência do evento

De acordo com a pesquisa de Lamm (1980), a Figura 14 apresenta a correlação entre a taxa de acidentes (*Accident Rate* - AR) e a distância de visibilidade de frenagem (*Stopping Sight Distance* - SSD). Para o nível de segurança

tomado como referência (2 acidentes por milhão de veículos-quilômetro), a distância de visibilidade crítica é de 100 m. Com esse parâmetro, pode-se estabelecer um limite de velocidade de projeto, sob a premissa de segurança. Nota-se também que a taxa de risco é praticamente estável e reduz muito pouco a partir de uma distância de visibilidade de 600 m. Segundo esta figura, há forte correlação entre a distância de visibilidade e o índice de acidentes. À medida que a visibilidade aumenta, há redução considerável do índice de acidentes. Projetos geométricos devem inserir análises quanto à distância de visibilidade de frenagem, visando majorar a segurança operacional.

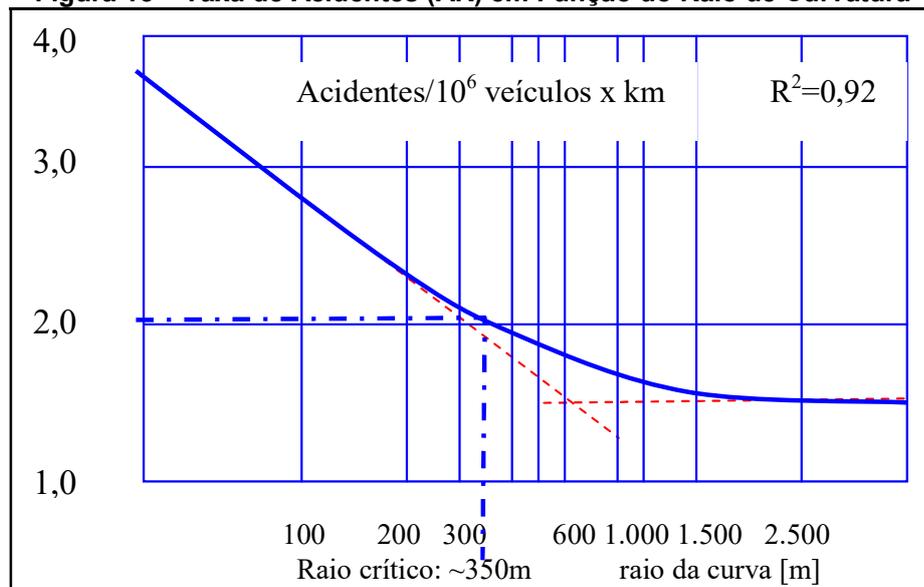
Figura 14 – Taxa de Acidentes (AR) em Função da Distância de Visibilidade



Fonte: Adaptado de: Lamm e Choueiri (1987)

Na Figura 15, Lamm (1980) apresenta a correlação entre a taxa de acidentes e o raio de curvatura horizontal. Para o nível de segurança tomado como referência, tem-se o raio de 350 m como crítico. Nota-se que para valores iguais ou superiores a 2.000 m de raio, não há mais variação sensível na taxa de acidentes, indicando que esses raios são suficientemente grandes para não interferir consideravelmente no movimento veicular. As assíntotas indicam raio da ordem de 600 m como possível limite de influência do raio horizontal na acidentologia.

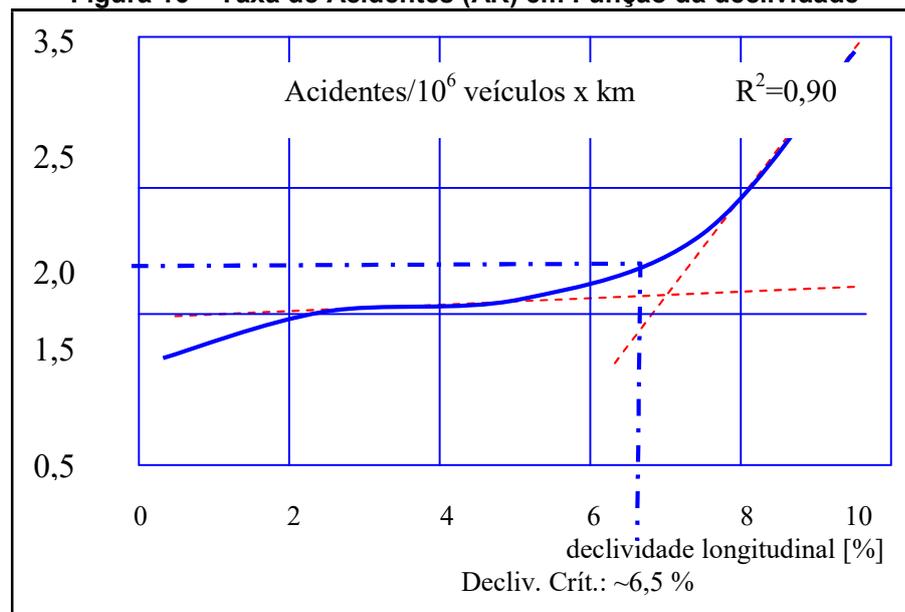
Figura 15 – Taxa de Acidentes (AR) em Função do Raio de Curvatura



Fonte: adaptado de: Lamm e Choueiri (1987)

Na Figura 16, Lamm (1980) apresenta a correlação entre a taxa de acidentes e a declividade longitudinal do segmento estudado. Para o nível de segurança tomado como referência, a declividade crítica é de 6,5%. Há uma variação reduzida na concentração de acidentes entre 2% e 5%, mas observa-se um aumento significativo a partir de 6,5% de declividade.

Figura 16 – Taxa de Acidentes (AR) em Função da declividade



Fonte: adaptado de Lamm e Choueiri (1987)

Segundo a Figura 16, a taxa de acidentes aumenta significativamente em declividades longitudinais superiores a 6%. Quando se associam as correlações de índice de acidentes com raios e declividades longitudinais, pode-se concluir o perigo operacional em curvas de raio reduzido precedidas por trechos de forte declividade descendente. O cruzamento das assíntotas na Figura 16 indica o aumento considerável de risco a partir de declividades superiores a 6,5%.

Outros fatores devem influenciar na segurança operacional de rodovias, quanto a elementos físicos. Valores indevidos de superelevação podem elevar a taxa de acidentes, magnitudes excessivas ou insuficientes podem gerar desestabilidades quanto à aceleração centrípeta descompensada.

Quanto ao Volume Diário Anual de Tráfego e à Velocidade de Operação, pode-se observar que a taxa de acidentes é maior em rodovias com altos volumes de tráfego e velocidades de operação elevadas.

Os resultados destas pesquisas indicam que os parâmetros geométricos têm influência significativa nas taxas de acidentes rodoviários. Curvas horizontais de pequeno raio, superelevação inadequada, declividades acentuadas e distâncias de visibilidade insuficientes representam fatores críticos para a segurança rodoviária. A oferta de melhorias nos projetos geométricos, como a adequação da superelevação, redução da declividade longitudinal e aumento das distâncias de visibilidade, pode contribuir significativamente, para a redução das taxas de acidentes. A pesquisa de Lamm (1980) fornece referências valiosas para orientar os engenheiros rodoviários na tomada de decisões.

A correlação entre o coeficiente de atrito e a taxa de colisões foi estudada por Wallman e Strom (2001). A relação é inversa entre as grandezas, para diferentes faixas de coeficiente de atrito. Quanto maior o coeficiente de atrito máximo do contato pneu-pavimento, maior é a faixa de coeficientes associados à estabilidade. Assim, um coeficiente de atrito elevado proporciona melhores condições de frenagem e aderência lateral, reduzindo a taxa de acidentes.

Hauer (1999) esclarece a influência do raio horizontal na incidência de acidentes, especialmente para raios de até 500 m. Raios de magnitude superior a 500 m pouco contribuem para a alteração dos dados de acidentes.

Estudos de integração entre estas grandezas foram efetuados por Vayalamkuzhi e Amirthalingam (2014), segundo equações que correlacionam a velocidade de operação às seguintes grandezas: declividade, superelevação,

acessibilidade e volumes diários médios (VDM), com base em modelos de previsão de acidentes, válido para pistas duplas de 4 faixas. Apresenta-se a correlação entre a velocidade de operação na curva em função de: superelevação, velocidade de operação na tangente anterior e sua declividade longitudinal na Equação 10, segundo regressão por Poisson. O artigo original não indica qual o sistema de unidades considerado. A Equação apresenta as variáveis de forma isolada, sem considerar a integração entre estas, tal como ocorre em multiplicações entre grandezas. O coeficiente de determinação estabelecido pelos autores para estas grandezas é de **0,64**.

$$\begin{aligned} V_{opMC} &= 15,138 - 0,684 \times i - 0,285 \times e + 0,718 \times V_{opT} \\ R^2 &= 0,64 \end{aligned} \quad (10)$$

Em que:

V_{opMC} : velocidade de operação no meio da curva (km/h)

i : declividade longitudinal (%)

e : superelevação (%)

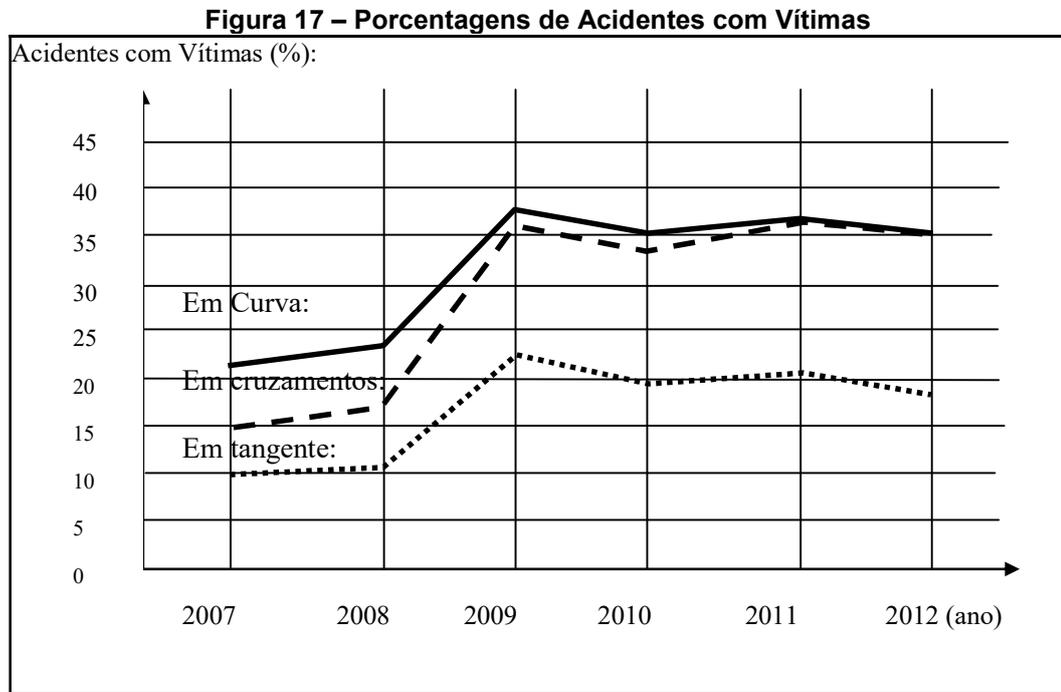
V_{opT} : velocidade de operação na tangente (km/h)

R^2 : coeficiente de determinação

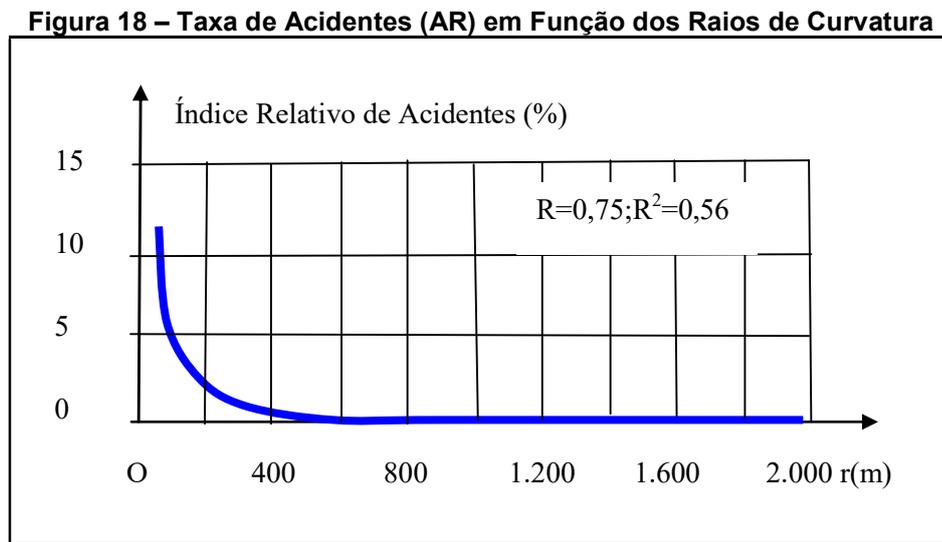
O artigo original não indica qual a natureza dos acidentes considerados. Caso acidentes sem vítimas tenham sido incluídos, os fatores geradores podem estar em número elevado, resultando em grande dispersão. O coeficiente de determinação entre a velocidade de operação e as variáveis geométricas é igual a 0,64.

Acidentes com vítima em rodovias da Tchecoslováquia foram analisados por Radimsky, Matuszkova e Budik (2015), quanto ao excesso de velocidade e à concentração de sinistros em tangentes ou curvas horizontais. O acervo pesquisado, eventos entre 2007 e 2012, apresenta informações sobre o local dos acidentes, associando-os à geometria viária, com destaque a tangentes e curvas horizontais. Os principais resultados da pesquisa foram: 59% dos acidentes em tangentes, em contraponto a 41% em curvas horizontais. O excesso de velocidade foi a causa principal dos acidentes. A severidade dos acidentes com vítimas foi maior em curvas do que em tangentes, apesar de sua menor porcentagem. Esta pesquisa realça a importância de estudos com foco em tangentes e curvas, para a adequada oferta de rodovias. O estudo não aborda a influência conjunta de extensão de tangentes e raios de curvaturas, na amostra analisada. Na Figura 17, os autores apresentam o índice relativo de acidentes ocorridos entre 2007 e 2012, ao longo de curvas,

tangentes ou em cruzamentos. Observa-se que raios maiores de 600 metros não geraram concentração de acidentes, em magnitudes de até 2.000 metros, tal como apresentado na Figura 18.



Fonte: Radimsky, Matuszkova e Budik (2015)



Fonte: Radimsky, Matuszkova e Budik (2015)

O Manual de Segurança Rodoviária (do Inglês: *Highway Safety Manual*, HSM) (AASHTO, 2001, p. 2-12) denomina Função de Desempenho de Segurança (FDS) a equação que correlaciona acidentes ao volume de tráfego e características da

rodovia; com ênfase em presença ou não de interseções, controle de tráfego, número de faixas ou canteiro central (AASHTO, 2001, p. 13). A FDS também pode ser subentendida como uma correlação entre índices de acidentes e características da geometria viária. O Manual cita o Fator de Modificação de Acidentes (FMA), que indica a possível redução esperada de acidentes ou de seus índices após determinada modificação ou alteração no projeto (AASHTO, 2001, p. 18). Segundo o HSM, a velocidade nas rodovias depende das características da seção transversal, dos segmentos de tangentes precedentes e sucessivos a determinados raios de curvatura, dentre outros fatores.

Acidentes são eventos raros e aleatórios que resultam em ferimentos ou danos materiais. Esses eventos são influenciados por uma série de fatores contribuintes interdependentes que afetam os eventos antes, durante e depois de um acidente” (AASHTO, 2001, p. 3-35, tradução nossa).

Pelo HSM, a análise do padrão dos acidentes deve ser associada a um grupo de características, onde a geometria viária se insere. Como os raios horizontais se incluem nestas análises, trata-se de uma abordagem indireta à aceleração centrípeta imposta de forma contínua ao movimento, ao enunciar as grandezas influentes do raio e da extensão da curva. Diferentes raios e extensões podem acarretar movimentos e níveis de segurança distintos (AASHTO, 2001, p. 10-12).

Dentre os parâmetros considerados em um FDS incluem-se raio, superelevação e declividade, que são grandezas que se associam à velocidade. Não há citação da extensão de tangentes, nem da associação destas na forma de curvas sequenciais (AASHTO, 2001, pp. 10-12 e 10-29).

Há uma equação de FMA que correlaciona raio horizontal, extensão de espiral precedente e comprimento da curva circular, como reproduzido na Equação 11 (AASHTO, 2001, p. 10-34), válida para qualquer sistema coerente de unidades e apresentada de forma conceitual. Nesta equação, há soma de fatores e não produtos entre estes, indicando premissa de independência dos fatores na geração dos acidentes.

$$FMA_{AH} = \frac{(1,55 \times D) + \left(\frac{80,2}{R}\right) - 0,012 \times LS}{1,55 \times D} \quad (11)$$

Em que:

FMA_{AH}: fator de modificação de acidentes

D: desenvolvimento da curva horizontal circular (m)

R: raio da curva horizontal (m)

LS: comprimento da espiral precedente à curva horizontal (m)

As influências da superelevação e declividade são tratadas em equações distintas (AASHTO, 2001, pp. 10-35). Estas equações podem ser aplicadas em conjunto, com valores referentes a cada grandeza e cada correlação, para uma análise ampla das questões que influenciam na geração de acidentes (AASHTO, 2001, pp. 10-44), mas com abordagem isolada de cada grandeza. Não há no HSM abordagem que leve em conta a influência de uma grandeza sobre a outra. Portanto, novas pesquisas sobre estas grandezas, analisadas de forma integrada, tendem a gerar avanços no conhecimento da relação entre elementos geométricos e acidentes.

Nestas Equações, o HSM indica que devem ser considerados fatores de correção locais, segundo topografia, clima, população e forma de anotação de acidentes; não cita a questão das diferenças de padrões de condução entre regiões de um país, tal como se pode observar pelos resultados.

O HSM cita relação entre FMA e raio de curvatura, onde raios de magnitudes superiores a 600 m geram risco nulo (AASHTO, 2001, pp. 13-27).

Os “Procedimentos para Estabelecer Sinalização em Curvas”, da Administração Federal de Rodovias dos EUA visa melhorar a efetividade da redução da velocidade em curvas (FHWA, 2011). Há menção de maior concentração de acidentes em curvas, o que requer sinalização específica, de acordo com a velocidade de segurança (FHWA, 2011). A declividade e a extensão de tangentes anteriores, bem como de raios de curvatura e superelevações, são abordadas em estudos separados. As estatísticas ao longo de mais de vinte anos mostram que os acidentes não são evitados mesmo com a presença da sinalização vertical; onde tanto ideograma da curva quanto limite de velocidade estão conjugados na mesma placa, mas com efetividade reduzida a nula.

Um tipo de acidente em curva que se caracteriza por número maior de vítimas por sinistro é o tombamento de ônibus. Em 2021, a frota brasileira destes veículos era da ordem de 673 mil, aproximadamente 0,6% do total nacional (Brasil, 2022-b). Esta frota sofreu alterações quanto ao tipo: a quantidade de ônibus padrão *Double Decker* (DD) passou a dominar a produção rodoviária. São mais altos que os

convencionais, podem ser fabricados com até 4,40 metros de altura, e devem ser dotados de equipamentos de segurança, como controle de velocidade e sistemas de frenagem de emergência e alerta de saída de faixa (Ramos, 2020). A participação de ônibus em acidentes de trânsito é comum, mesmo em países desenvolvidos como os do continente europeu (Evgenikos et al., 2016). A alta ocupação de passageiros, aliada à frequente a quase absoluta falta de uso de cinto de segurança, aumenta o número de vítimas nesses eventos (Rhaman et al., 2011). Pesquisadores destacam fatores influentes na gravidade destes acidentes: dimensões veiculares (Chimba et al., 2010), que influenciam na estabilidade lateral; condições de operacionais (Shahla et al., 2009), como carga e manutenção; perfil dos condutores (Tseng, 2012) em termos de idade, gênero, nível de experiência, dentre outros fatores. As condições climáticas também influenciam, contudo, não há consenso na literatura (Huting et al., 2016).

Ferraz et al. (2012) defendem que a ocorrência de longa tangente ou curvas suaves anteriores a uma curva de raio reduzido pode contribuir para a ocorrência de acidentes. Quanto ao tráfego de ônibus e caminhões, o traçado inadequado também pode prejudicar a estabilidade lateral, sujeitando-os a um maior risco de derrapagem ou capotamento, uma vez que a aceleração centrípeta necessária é função de velocidade e raio (Setti, 2011). Autores como Li et al. (2017) defendem que o tombamento ou derrapagem de ônibus resulta em acidentes com maior proporção de lesões graves ou mortes do que quando sujeitos aos outros tipos de acidentes rodoviários.

As forças oriundas do movimento de ônibus podem influenciar não só na ocorrência de acidentes mas também no conforto dos passageiros, em função da visão restrita à frente, reduzindo a previsibilidade de acelerações tanto longitudinais quanto laterais, além do risco de quedas dos que estejam se deslocando no interior do veículo (Schubert et al., 2017). García-Ramirez e Aguillar-Cárdenas (2021), avaliaram o efeito da aceleração centrípeta sobre os ocupantes de veículos que trafegam em uma estrada de montanha nos Andes, sob aceleração transversal da ordem de 2 m/s^2 , que gerou certo desconforto, enquanto da ordem de 4 m/s^2 causava grande desconforto.

Eboli et al. (2016) aplicaram questionários a estudantes que usufruíam do transporte público na região da Universidade da Calábria/Itália, buscando mensurar o conforto percebido por esses durante as viagens de ônibus, considerando as

acelerações instantâneas dos ônibus, de caráter longitudinal, lateral ou vertical. Estas foram obtidas a partir do uso de *smartphone* equipado com um programa aplicativo, posicionado em um plano horizontal no interior do veículo pesquisado.

Macedo (2020) desenvolveu uma pesquisa visando predição de acidentes em rodovias rurais de pistas simples a partir de Sistema de Informações Geográficas (SIG), para a efetivação de recursos em melhorias. As curvas horizontais foram destacadas segundo seus raios, VDM, declividades e extensões de alinhamentos anteriores às curvas.

A relevância do tema se amplia, com dados de custos dos acidentes de trânsito no Brasil, tanto em vias rurais quanto urbanas. Segundo o IPEA (Carvalho, 2020), o impacto financeiro relativo aos acidentes rodoviários no Brasil foi estimado em cinquenta bilhões de Reais, para o ano de 2014, tanto para vias urbanas quanto rurais. Este montante engloba custos pré-hospitalar, hospitalar, pós-hospitalar, perda de produção, remoção de paciente, remoção de veículos e custos de danos, perda de carga de veículos comerciais, com dados devidamente tratados em modelo específico matemático, com resultados relevantes apresentados no Quadro 4. Esta abordagem auxilia na elaboração de justificativas de custos de melhorias comparados com custos de acidentes que serão evitados.

Quadro 4 – Custos de Acidentes Rodoviários em Rodovias Federais em 2014

Tipo de Acidente:	Custo/acidente	Número Total de Acidentes	Número Total de Mortos	Custo/morte
Com vítimas fatais	R\$ 664.821,46	6.743	8.233	R\$ 544.502,37
Com vítimas não fatais	R\$ 96.747,79	62.346	-	-
Acidente sem vítimas	R\$ 23.498,77	98.158	-	-

Fonte: Carvalho (2020)

Yin, Sun e Hou (2020) pesquisaram a influência da geometria da rodovia e a instabilidade lateral veicular, com base na dinâmica do movimento sob influência da velocidade e da geometria em curvas horizontais, enfatizando coeficiente de atrito, raio de curvatura, superelevação e declividade longitudinal. O trabalho discorre sobre a desestabilidade em termos de capotamentos e derrapagens em curvas. Desenvolveram abordagem numérica sobre grandezas influentes sobre

veículos, sem análise do efeito integrado entre as grandezas quanto ao risco operacional.

Sun et al (2021) desenvolveram um trabalho virtual de movimento veicular com trajetória circular fechada pelo simulador mecânico *CarSim*, para avaliar a influência da rugosidade do pavimento na estabilidade veicular em termos de derrapagens e tombamentos, visando oferecer informações para a manutenção de pavimento, segundo a interação piso e veículo, sob ótica da Engenharia Mecânica. Não aborda ações indutoras de velocidade, como a de uma tangente precedente e em declive, nem o risco rodoviário segundo grandezas físicas integradas.

Não foram localizados trabalhos de correlação entre acidentes e grandezas geométricas rodoviárias, tratadas de forma integrada, quando um determinado valor de uma grandeza influi em outra, tendo por fundamento a aceleração centrípeta. A ênfase da busca se concentrou em elementos indutores ao aumento da velocidade, como extensão e declividade de tangentes precedentes a curvas que impusessem restrição de velocidade, considerando raios de curvatura horizontal e superelevação, associados a bancos de dados de acidentes.

2.6.4 Tipologia de Acidentes e Classificação de Feridos

Os diferentes tipos de acidentes estão classificados no Quadro 5, com descrição e as causas geradoras. São considerados fatores externos aos veículos, bem como distintas ações de imposição de esforços sobre o veículo que devem acarretar perda de controle veicular.

Quadro 5 – Tipologia e Causas de Acidentes Rodoviários

Tipo de Acidente	Definição	Possíveis Causas
Atropelamento	Acidente em que pedestres ou animais sofrem o impacto de um veículo, estando pelo menos uma das partes em movimento.	Este tipo de acidente pode ocorrer por causa de falta de visibilidade do pedestre, por ato inseguro do pedestre, podendo estar associado a excesso de velocidade ou atenção desviada, pela perda de controle do veículo e saída da pista.
Tombamento	Acidente em que o veículo sai de sua posição normal, imobilizando-se sobre uma de suas laterais, sua frente ou traseira	Pode ocorrer por causa de uma colisão, choque ou saída da pista e queda sobre uma superfície situada em plano inferior ou, ainda, subida ou queda em um barranco.
Capotamento	Acidente em que o veículo gira sobre si mesmo, em qualquer sentido, chegando a ficar com as rodas para cima, imobilizando-se em qualquer posição.	As principais causas deste tipo de acidente são as mesmas que de tombamentos, porém mais acentuadas.
Choque	Acidente em que há impacto de um veículo contra qualquer objeto fixo ou móvel, mas sem movimento.	Pode ocorrer quando o condutor perde o controle do veículo e sai da pista, por qualquer razão, vindo a atingir um obstáculo fixo ao lado da pista. Pode ocorrer também quando um objeto se desprende de um veículo, cai sobre a pista e é atingido por outro veículo.
Colisão	Acidente em que um veículo em movimento sofre o impacto de outro veículo, também em movimento. Abaixo são mencionados 4 tipos.	Invasão, distração ou influenciada por alterações na via.
Colisão Frontal	Colisão que ocorre frente a frente, quando os veículos trafegam em mesma direção, em sentidos opostos.	A principal causa deste acidente é um veículo invadir a pista de tráfego do sentido oposto.
Colisão Lateral (abalroamento lateral)	Colisão que ocorre lateralmente, quando os veículos trafegam em mesma direção, podendo ser no mesmo sentido ou em sentidos opostos.	Normalmente ocorre quando um dos veículos não percebe a presença do outro e invade a faixa adjacente, seja para realizar ultrapassagem, conversão, ou mudar de faixa. Pode acontecer, também, de o veículo invadir parcialmente a pista contrária. Além disso, pode ocorrer em áreas de convergência de interseções e acessos.
Colisão transversal (abalroamento transversal)	Colisão que ocorre transversalmente, quando os veículos trafegam em direções que se cruzam, ortogonal ou de forma oblíqua.	De maneira geral, ocorre em cruzamentos viários quando um dos veículos avança indevidamente em local de preferência de tráfego (“Dê a Preferência”, “Pare” ou semáforo), ou desrespeita a preferência de passagem. Pode estar associado à falta de visibilidade.
Colisão Traseira	Colisão que ocorre entre a frente de um veículo e a traseira de outro ou entre a traseira de dois veículos, quando esses trafegam no mesmo sentido ou em sentidos contrários, podendo pelo menos um deles estar em marcha a ré.	Comumente ocorre quando o veículo à frente freia de maneira brusca, ou se locomove com velocidade muito baixa, e o veículo de trás não consegue frear a tempo, seja por estar muito próximo ou trafegando com velocidade muito alta. Pode ocorrer em casos de velocidade diferencial elevada entre veículos que trafegam na mesma direção.
Engavetamento	Acidente em que há impacto entre três ou mais veículos, em um mesmo sentido de circulação.	Pode ocorrer quando não há distância mínima de segurança entre os veículos (compatível com suas velocidades), por ondas de congestionamento, ou quando a visibilidade fica reduzida repentinamente em casos de neblina ou fumaça na pista. Nesses casos, uma colisão entre dois veículos pode desencadear colisões múltiplas.
Queda	Acidente em que há impacto em razão de queda livre do veículo, ou queda de pessoas ou carga por ela transportadas.	Ocorre normalmente quando há queda do veículo em um terreno lateral inferior, quando pessoas caem ou quando a carga de um veículo cai por não estar bem atada a ele.

Fonte: Adaptado de Manual de Segurança Viária (DETRAN-INFOSIGA, 2022)

2.6.5 Identificação de Locais Críticos

A identificação de locais de maior concentração de acidentes e severidade deve ser estabelecida por índices e métodos de reconhecimento. O Instituto Federal Alemão de Pesquisas Rodoviárias desenvolveu programas informatizados para identificar locais de maior concentração de sinistros. Os aplicativos resultantes consideram o índice de periculosidade, estabelecido nos locais onde se tenha valor maior que a média da ocorrência de sinistros, estudados a partir de uma rede de tráfego, segundo os segmentos viários e nós; pontos de cruzamento de linhas de fluxo ou tráfego convergente e divergente, aplicável a vias rurais, com base de dados experimentais, para a Renânia e Baviera (Strassenwesen, 2008).

3 MÉTODO

Neste capítulo, os processos de obtenção e de tratamento de dados de acidentes e das informações de geometria rodoviária são apresentados, bem como os modelos de estudo para a concepção de regressões de grandezas integradas da geometria, associadas aos bancos de acidentes de tráfego selecionados. São também apresentadas as equações inerentes à modelagem e a estrutura das planilhas de cálculo, para embasar as devidas relações matemáticas.

Os itens estão associados às fases de efetivação do trabalho: Seleção de Rodovias, Avaliação de Excesso de Velocidade, Dados de acidentes, Elementos da Geometria Rodoviária, Modelo Cabo de Guarda-Chuva, Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado e Modelo Arco-Íris.

Adotou-se, neste trabalho, a denominação de trecho rodoviário à extensão de pesquisa de uma rodovia, composta por segmentos que incluem parte inicial, de aceleração ou manutenção de velocidade; e parte final, de imposição de redução de velocidade.

O estudo correlaciona trajetória veicular, a que é definida pelo condutor, que pode diferir sensivelmente do traçado geométrico físico, a bancos de dados de acidentes. Para essa associação de bancos de dados, não há necessidade de precisão de dados da via com o rigor usual para a incorporação de empreendimentos.

Quanto ao período de levantamento de acidentes, buscou-se impor intervalo de anos onde se tivesse volume global de dados suficiente para se evitar questões sazonais e influência pontual de alterações de leis de trânsito. Os bancos de dados deveriam ser providos com quantidades mínimas de 50 valores, evitando restrições dos modelos estatísticos aplicados às regressões resultantes. Ponderou-se que, para um período reduzido de, por exemplo, 5 anos, talvez não se tivesse massa suficiente de dados ou ainda questões randômicas poderiam influenciar. Caso o período de levantamento fosse muito extenso, por exemplo, de 20 ou mais anos, diferenças tecnológicas veiculares bem como formas distintas de condução veicular poderiam gerar distorções nos estudos. Outra barreira possível de inserção de possíveis influências corresponderiam a levantamentos anteriores a 1997, da época do Código de Trânsito antigo. Optou-se por período da ordem de 10 a 20 anos. Para

estimativas de índices, optou-se pelo VDM médio de todo o período, caso não fosse disponível ano a ano.

O parâmetro estatístico tomado como balizador na avaliação dos Modelos, tanto na fase de teste bem como a fase de validação é o coeficiente de determinação, obtido a partir das regressões efetuadas entre os valores de Índice de Risco Viário (IRV) e bancos de dados de acidentes dos trechos rodoviários selecionados, em termos de tipos e quantidade de sinistros. Para o teste dos modelos escolheu-se o trecho serrano da SP 98, entre Mogi das Cruzes e Bertioga, no estado de São Paulo. Para a validação, o trecho serrano fluminense da BR 101, em Guapimirim, entre Teresópolis e o município do Rio de Janeiro.

A sequência de atividades para a concepção de regressão de análise de um dado tipo de acidente ou veículo associado a um dado trecho de rodovia pode ser efetivada segundo o fluxograma da Figura 19.

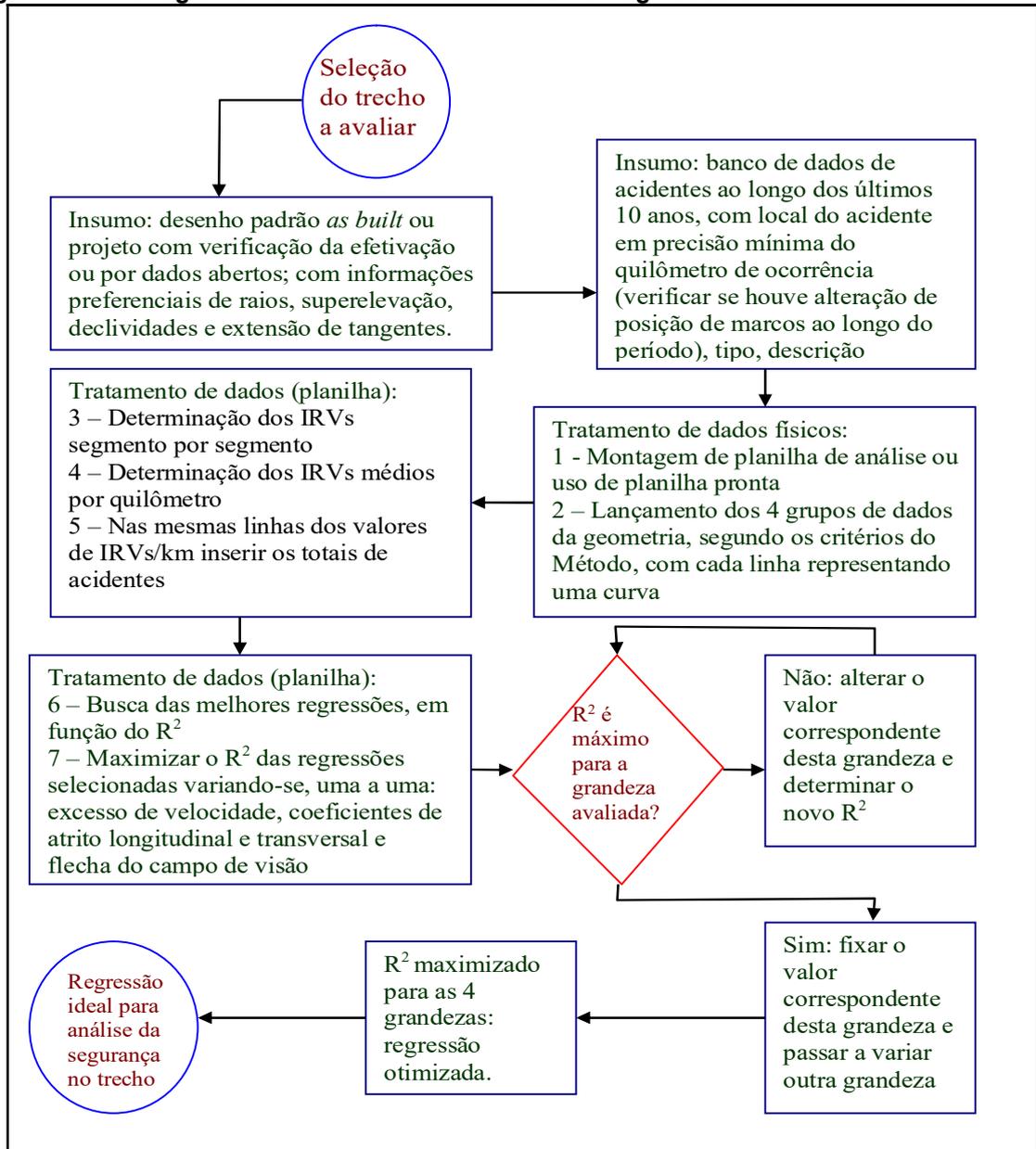
3.1 Seleção de Trechos Rodoviários

Neste trabalho, dados históricos de sinistros de rodovias são associados aos elementos de traçado geométrico e à velocidade veicular, tendo como grandeza indireta a aceleração centrípeta em curvas horizontais. Trechos de rodovias foram selecionados para a devida adequação às restrições e condições impostas nesta pesquisa. Deveriam apresentar condições específicas de oferta de traçado, para que se tivesse um ambiente propício à aplicação de possíveis modelos de associação entre as grandezas estudadas, bem como resultados de correlação com maiores coeficientes de determinação, critério estatístico adotado como balizador qualitativo das análises entre as séries numéricas.

A escolha dos trechos foi condicionada às seguintes premissas: rodovia de pista única em região serrana, com traçado sinuoso e declividade predominantemente descendente, com esta última assertiva aplicável nas análises dos modelos propostos. Justifica-se esta abordagem, observando-se que, em rodovias de pista única, a perda de controle em curva horizontal pode levar à invasão da faixa de mão oposta, causando possíveis acidentes de maior severidade, devido à eventual colisão com veículos trafegando em sentido inverso. A quantidade

de energia de impacto nestes acidentes é, em geral, superior ao máximo que o habitáculo veicular suporta, dada a alta mortalidade nestes sinistros.

Figura 19 – Fluxograma do Desenvolvimento de Uma Regressão entre IRV e Acidentes



O traçado sinuoso, caracterizado por curvas horizontais frequentes ao longo de traçado descendente, influencia na geração de acidentes devido à tendência de aumento de velocidade até que curvas de raio reduzido sejam atingidas; quando considerável força centrípeta e o menor campo de visibilidade aumentam consideravelmente o risco operacional. As longas descidas, que induzem motoristas

ao aumento da velocidade, colaboram no estabelecimento de trajetórias próximas ao limite de aderência, caso não haja um sistema ostensivo de fiscalização.

A qualidade do pavimento não influi na seleção do trecho, somente o tipo. Restringe-se o estudo a pavimentos do tipo flexível, com revestimento asfáltico; ou rígido, com placas de concreto de Cimento Portland. Desta forma, excluem-se trechos com revestimentos na forma de calçamento com blocos de concreto ou blocos de paralelepípedos rochosos, como os presentes nos trechos de descida da Serra do Mar entre Paraty e Cunha e de Lídice a Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro. Quanto ao estado do pavimento dos trechos em análise, estes não devem apresentar defeitos que possam obrigar motoristas a desviar ou reduzir a velocidade de forma significativa. Quanto à qualidade, este trabalho não considera características específicas dos pavimentos, tais como regularidade, aderência e estado de uso.

Apresentam-se como sítios preferenciais de busca vias pavimentadas nas Serras do Mar e da Mantiqueira em função do maior desnível do que a Serra Geral, que corta o interior do Estado de São Paulo. Nestas duas primeiras, há maior oferta de rodovias sinuosas e com longos trechos em descida, favoráveis à aplicação dos modelos propostos.

A ocorrência de graves sinistros com ônibus foi outro fator que se considerou na seleção de trechos. O critério de seleção de severidade específica foi o alto nível de impacto humano e em mídias de grande veiculação, sob provável causa de excesso de velocidade em rampas longas sucedidas por curvas horizontais de raio reduzido.

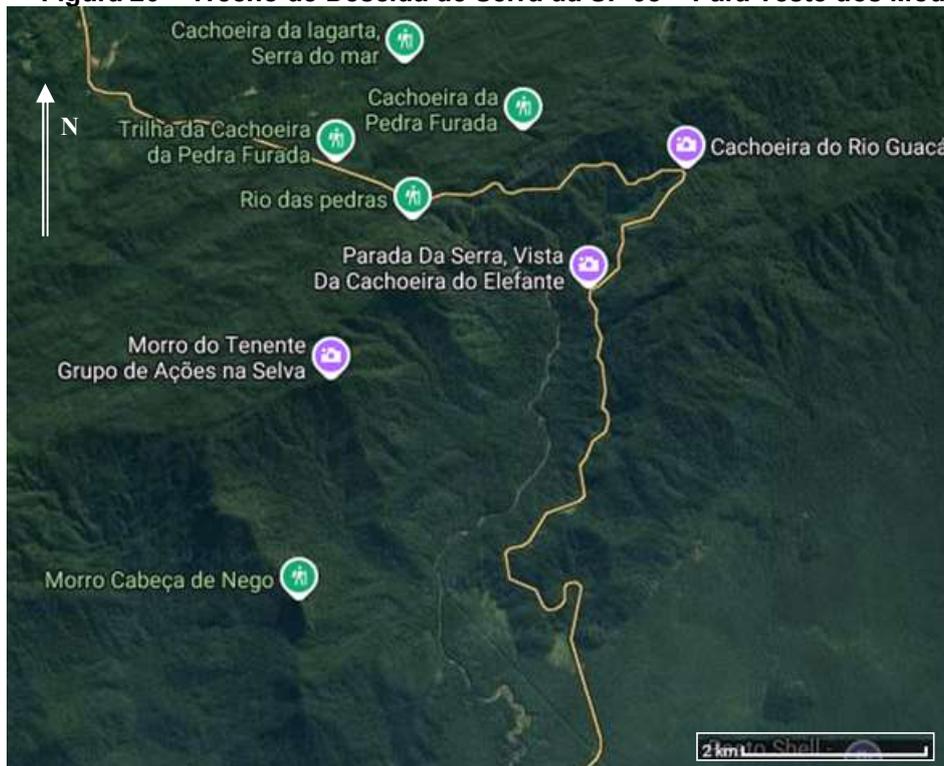
Com base nestas premissas, foram selecionados trechos para a parte inicial da pesquisa, visando levantamento de medições de velocidades em campo, para possível constatação de prevalência de movimentos sob excesso de velocidade e a magnitude do excesso, quanto à velocidade permitida; para avaliar a liberdade de velocidade e seu excesso, que são fatores influentes nas análises de correlação entre geometria e acidentes, visando o teste de modelos bem como as validações destes.

O primeiro trecho selecionado para as medições de velocidade pertence à BR 101, situado próximo à Jacuecanga, no município de Angra dos Reis, Estado do Rio de Janeiro. Apresenta alinhamento ao longo da base da encosta da Serra do Mar, tendo sido liberado ao tráfego em 1975, com oferta de pista única até ao presente

momento, mesmo perante ao considerável aumento de volume de tráfego em quase meio século (Barbosa, 1975). Justifica-se esta adoção por apresentar alto nível de serviço e forte concentração de acidentes, além das características anteriormente mencionadas.

Para o teste dos modelos propostos, selecionou-se o trecho de descida da Serra do Mar ao longo da SP 98 Rodovia Dom Paulo Rolim Loureiro, no Estado de São Paulo, tal como apresentado na Figura 20, entre Mogi das Cruzes e Bertioga, inaugurado em 1982, com pista única até a atualidade e elevada concentração de sinistros (5 PONTOS, 2022). O VDM do trecho é da ordem de onze mil, entre 2019 e 2022 (DER, 2023). Justifica-se a seleção deste trecho em face das restrições ambientais que limitariam possíveis projetos de duplicação, bem como pela ocorrência de sinistro de forte apelo social, de tombamento de ônibus com estudantes, computando-se 18 vítimas fatais, em 2016 (Rocha *et al*, 2016).

Figura 20 – Trecho de Descida de Serra da SP 98 – Para Teste dos Modelos

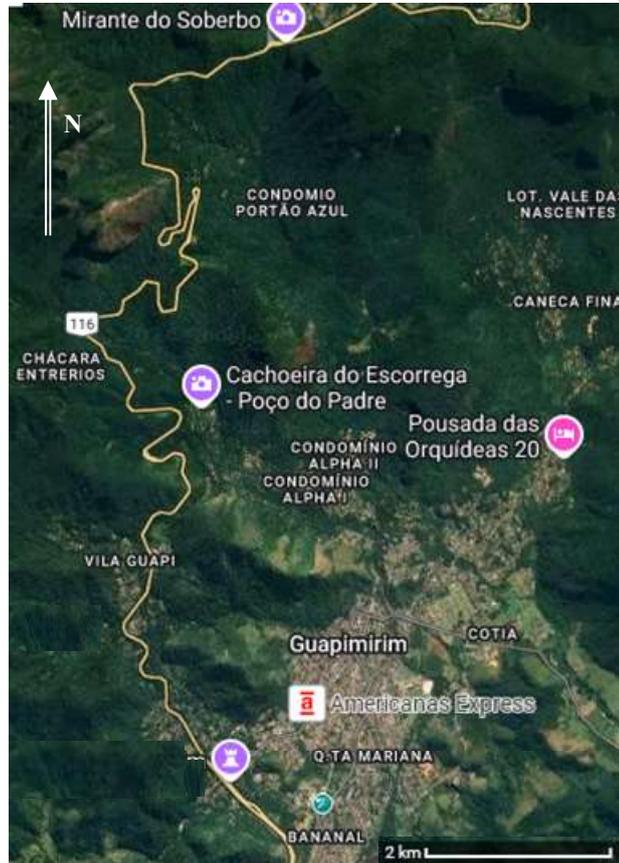


Fonte: Google Earth (2024)

Selecionou-se o trecho de descida da Serra dos Órgãos da BR 116, entre Teresópolis e Guapimirim, no Estado do Rio de Janeiro, tal como apresentado na Figura 21, para validar possíveis modelos de tratamento dos dados. O VDM era superior a trinta e cinco mil em 2021 (CONCESSIONÁRIA RIO-TERESÓPOLIS,

2022). Justifica-se esta seleção por apresentar elevado nível de serviço, com pista única e mão dupla. Também apresenta sinistro de tombamento de ônibus com 15 mortes em 2014 (EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO, 2014).

Figura 21 – Trecho de Descida de Serra da BR116 – Para Validação dos Modelos



Fonte: Google Earth (2024)

3.2 Avaliação de Excesso de Velocidade

Para avaliar o excesso de velocidade em rodovias de pista única e em região serrana, foram estabelecidos dois procedimentos: aplicável para mensurações ao longo de um trecho e para pontos específicos. Na avaliação ao longo de um trecho, trafegou-se com o veículo de pesquisa na velocidade permitida, anotando os veículos que o ultrapassavam bem como os veículos ultrapassados, visando cômputo estatístico. Para o levantamento em pontos específicos, foram selecionados locais ao longo da BR 101 em Angra dos Reis/RJ. Foram anotados os tempos de percurso dos veículos que cruzavam duas referências próximas, desconsiderando-se os que não estivessem em fluxo livre, ou seja, os que tinham

veículo à frente, restringindo a velocidade. Apesar da facilidade de medição de velocidade instantânea com radar, preferiu-se a medição sem nenhuma ação ostensiva, que poderia induzir motoristas a frear. O pesquisador permaneceu no interior de um automóvel, anotando os tempos de percurso com cronômetro de aplicativo de um smarphone Samsung J7. As distâncias entre os pontos de medição de tempo de percurso dos veículos foram aferidas com Distanciômetro Eletrônico EDM (*Electronic Distance Meter*) BOSCH GLM 80 e verificado também pelo navegador de celular. Os tempos foram processados em planilhas eletrônicas de processamento de dados, com estimativa de velocidades médias e máximas de cada classe veicular.

Não se utilizou do conceito da V_{85} que corresponde a 85% do percentil de distribuições de velocidades, em condições de fluxo livre, tal como descrito por Lamm et al (, 1999); pelo fato de que não se buscava determinar a velocidade de operação dos trechos estudados e sim o percentual de excesso de velocidades a partir de amostras.

Para o procedimento utilizou-se um automóvel da frota nacional atual, com velocímetro digital: um HB 20 Sedan/2014, veículo de reduzida massa e ocupado apenas por duas pessoas, para facilitar o retorno rápido à velocidade permitida, em caso de necessidade de mudança de velocidade para garantir segurança. Caso ocorresse redução de velocidade que influenciasse nas ultrapassagens ou a variação fosse superior a 10 km/h, a contagem no trecho seria refeita. A anotação das ultrapassagens era executada por acompanhante.

3.3 Obtenção dos Elementos da Geometria Rodoviária dos Trechos

Cada trecho rodoviário foi segregado em segmentos, compostos, por sua vez, por extensão inicial, de possível aceleração ou manutenção de velocidade, e extensão final, onde a redução de velocidade é necessária devido ao raio de curvatura horizontal de baixa magnitude. Eventuais curvas horizontais de raio elevado e extensão circular reduzida foram eventualmente consideradas na extensão inicial, de possível aceleração ou manutenção de velocidade.

Foram considerados como fontes destes dados os desenhos dos trechos das rodovias selecionadas ou projetos que tenham revisão do tipo *as built*⁴. Outra fonte de dados corresponde aos abertos da *web*, como *Google Maps*, *Google Earth*, e *Google Street*.

3.3.1 Obtenção dos Elementos Geométricos por Dados Abertos

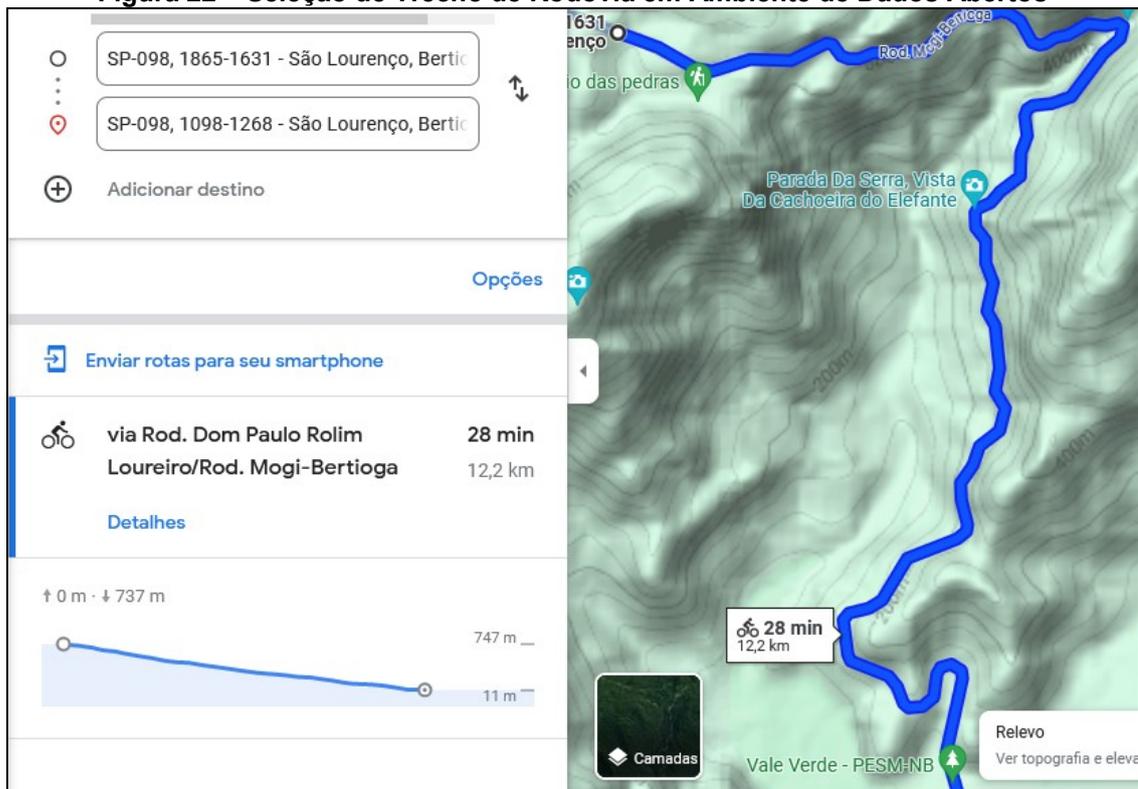
O uso dos dados topográficos abertos na rede mundial de computadores está sujeito a erros que os distinguem dos oriundos de desenhos rodoviários. No entanto, busca-se avaliar dados assim obtidos para permitir a expansão do estudo para praticamente todas as rodovias.

A técnica de obtenção dos elementos foi estabelecida visando o lançamento do eixo e elementos geométricos do alinhamento. O lançamento do eixo rodoviário de levantamento foi efetivado com fundo no modo “relevo” do *Google Maps*. Usa-se a opção “rotas” para bicicletas, para estimativas de declividades longitudinais. A linha realçada que surge no mapa, entre os pontos selecionados, corresponde ao trecho em estudo, tal como o exemplo da Figura 22, válida para a SP 98.

Em seguida, com a ferramenta “medir distância”, inicia-se o lançamento de uma linha “quebrada” composta por retas representativas de tangentes rodoviárias, sobre o alinhamento do trecho, buscando manter os segmentos de reta “dentro” da plataforma da rodovia, cuja espessura da linha não representa necessariamente a largura real, caracterizando apenas como procedimento que permita a reprodução em outros trechos. Na Figura 23, apresenta-se um exemplo de parte do trecho em descida da Serra da SP 98 com o eixo rodoviário e linha de tangentes, lançada, utilizando a ferramenta “medir distância”.

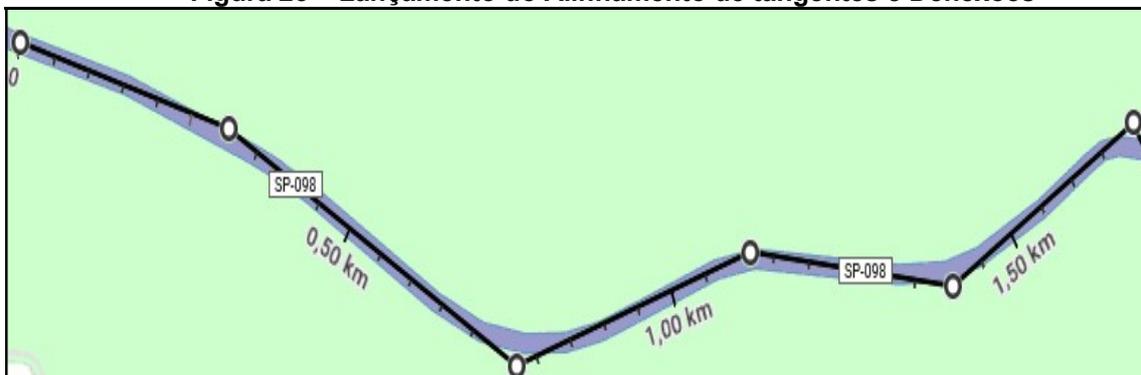
⁴ Desenho da rodovia já construída ou o projeto que foi utilizado para incorporar, com as devidas alterações efetivadas ao longo do processo construtivo

Figura 22 – Seleção de Trecho de Rodovia em Ambiente de Dados Abertos



Fonte: Google Maps (2023)

Figura 23 – Lançamento do Alinhamento de tangentes e Deflexões

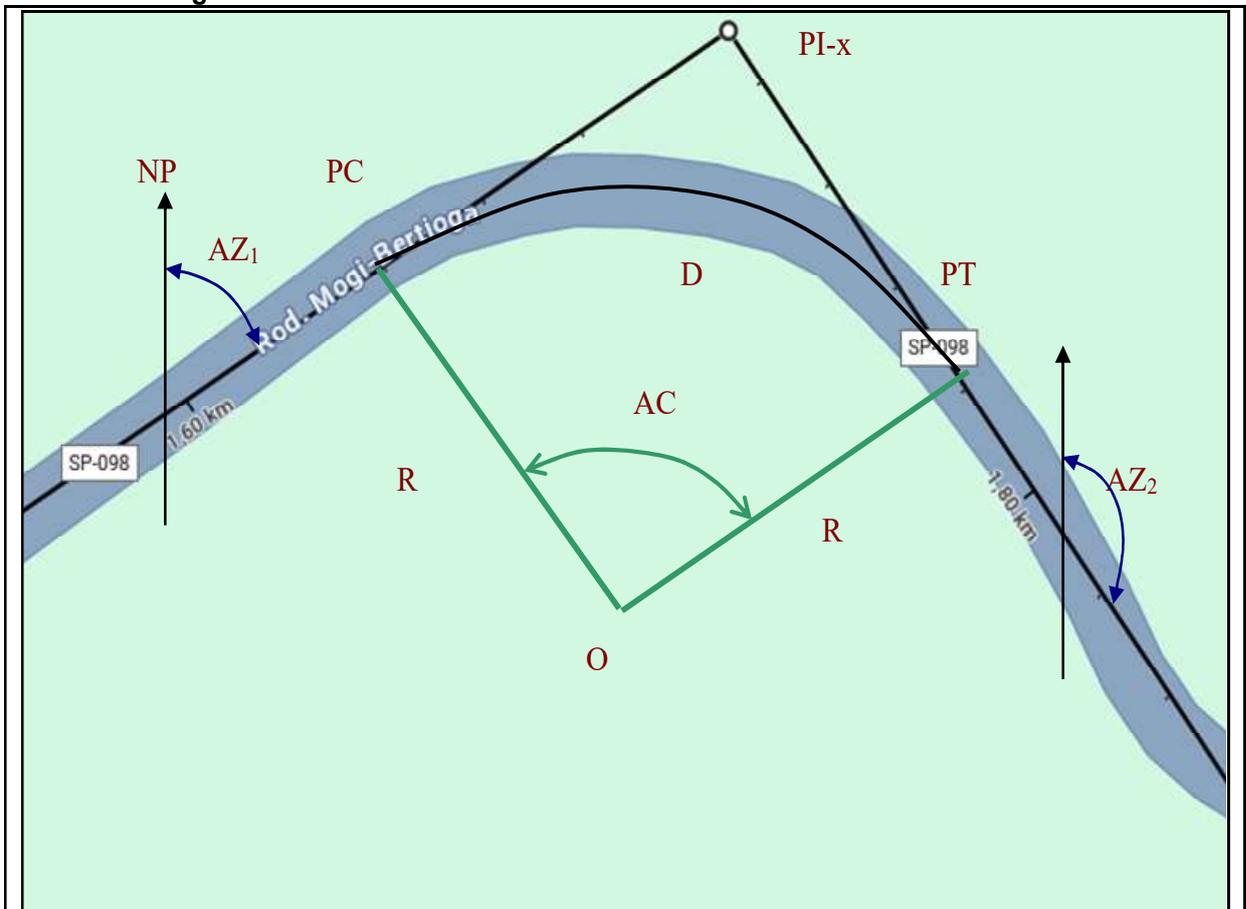


Fonte: Google Maps (2023)

Lançada a linha destas tangentes sobre o eixo curvilíneo da rodovia, tem-se a base para estimativas das magnitudes de tangentes entre curvas e raios de curvatura horizontal. Para se estabelecer a magnitude dos raios, em procedimento de eixo simplificado, composto por tangentes e curvas circulares de deflexões e extensões significativas; pode-se imprimir curva por curva ou copiar a imagem em programa de desenho assistido por computador, para se determinar os pontos de início e fim de cada extensão circular; denominados ponto de início de curva circular

(PC) e de início de tangente após o término uma curva circular (PT), no sentido crescente do estaqueamento, que corresponde ao eixo da via referenciado, em fase de incorporação. O estabelecimento destes pontos exige localizar onde o eixo rodoviário inicia o afastamento da tangente, indicando início da curva circular. No local onde a pressuposta curva circular se encontra novamente com a reta subsequente, tem-se o ponto final da curva. Em seguida, traçam-se retas perpendiculares a estes pontos, determinando o centro “O” da curva horizontal; tal como a Figura 24 apresenta.

Figura 24 – Técnica de Estabelecimento dos Pontos PC e PT das Curvas



AZ1: azimute da tangente inicial

AZ2: azimute da tangente final

PI-x: ponto de intersecção de número “x” entre tangentes

PC: ponto de início da curva horizontal

PT: ponto de início da tangente posterior

AC: deflexão entre os alinhamentos, igual à diferença de azimutes

D: desenvolvimento do trecho circular (extensão circular)

R: raio de curvatura horizontal

Fonte: Google Maps (2023)

Obtém-se a extensão da tangente entre os segmentos circulares e a magnitude do raio circular de cada curva por medição direta sobre impressão do segmento ou do trecho, bem como com ferramentas de desenho assistido por computador, sobre imagens virtuais.

A mensuração por coordenadas latitude e longitude, facilmente obtidas no *Google Maps*, com atributos oferecidos com uso do “botão direito” do mouse sobre o ponto em estudo, poderia oferecer extensão com mais precisão. Contudo, análises efetuadas indicaram que o grau de liberdade do cursor sobre a tela acarreta pares de coordenadas com maior dispersão de valores do que a simples medição sobre o alinhamento estabelecido. O elevado número de casas decimais das coordenadas espaciais apresentadas após o procedimento do clicar sobre a tela não contribui na precisão do ponto desejado, pelo fato de que ocorre o “desaparecimento” do eixo em estudo da tela, quando se clica para se obter as coordenadas. Assim, acaba-se por se “clicar” em pontos aproximados, inserindo-se erro.

A Tabela 6 apresenta um exemplo de determinações de extensões de tangentes, raios horizontais e deflexões a partir de coordenadas espaciais do ambiente *Google Maps*, processadas por planilha eletrônica Microsoft Excel. As magnitudes de tangentes entre curvas horizontais e raios de curvatura resultantes são muito diferentes dos valores do *as built* do trecho. O processo de determinações das grandezas a partir da estimativa dos azimutes pela *web* foi desconsiderado.

As extensões das tangentes e raios de curvatura passaram a ser exclusivamente obtidas por medições diretas sobre os desenhos, tanto virtuais quanto físicos. O processo a partir de impressão em papel considerou o uso de aparato mecânico; com régua ou escalímetro, para as medições de tangentes e raios segundo a escala presente no eixo; compasso, para auxiliar nas estimativas de ângulo central e transferidor para leitura das deflexões, com precisão de leitura de meio grau, limite deste equipamento. Auxílios eletrônicos estão disponíveis em desenho assistido por computador para as medições correspondentes em meio virtual.

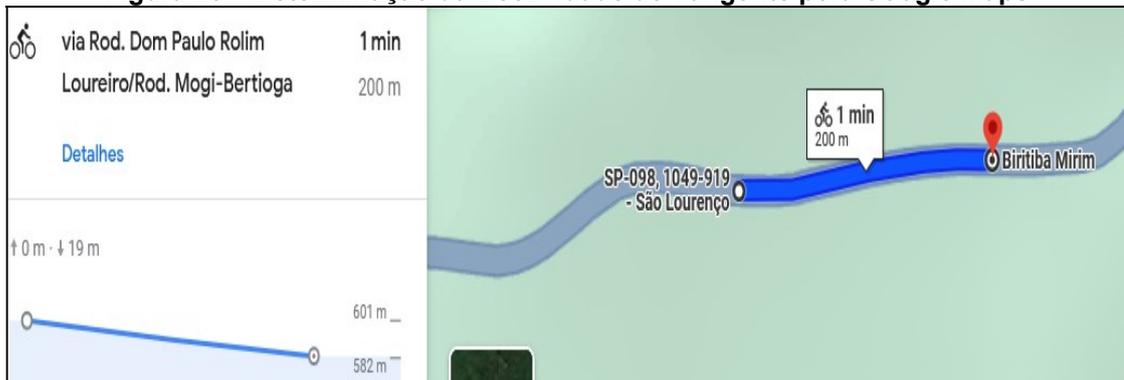
Tabela 6 – Exemplo de Determinações Geométricas Por Coordenadas do Google Maps

Curva:	estacas do PC:		km		m	extensão (m)	obtido por imagem				azimutes:		tangente		Raio		trecho	
							no google maps:				no PC:		anterior:	corda:	horizontal	circular:		
							quilômetro do PC:		coordenadas do PC:		coordenadas do PT:		no PT:	da corda PC-PT:	"via reta"	entre PC-PT:		horizontal
latitude:	longitude:	latitude:	longitude:	Az1	Az2	L (m)	L (m)	R (m)	D (m)									
(0) ou PTanterior	0	+	0,00	67	+	320	0,00											
1	56	+	7,35	68	+	447	1127,35	-23,100012	-45,688092	-23,099926	-45,687968	55,2934177	56,4352146	55,6849124	1127,35	16,95	850,55	16,95
2	83	+	16,99	68	+	997	1676,99	-23,097191	-45,683844	-23,097086	-45,683644	56,4352146	54,6650665	57,9946168	549,64	26,21	848,45	26,21
3	84	+	15,24	69	+	15	1695,24	-23,096971	-45,683510	-23,096882	-45,683364	54,6650665	54,3239981	58,6339728	18,25	19,00	3199,21	19,04
4	101	+	1,60	69	+	342	2021,60	-23,095169	-45,680978	-23,095003	-45,680737	54,3239981	54,9233680	55,4410584	326,36	32,52	3108,78	32,52
5	108	+	15,69	69	+	496	2175,69	-23,094206	-45,679602	-23,094030	-45,679345	54,9233680	55,5677359	55,5956855	154,10	34,61	3077,58	34,61
6	257	+	2,33	72	+	462	5142,33	-23,078933	-45,657323	-23,078735	-45,657010	55,5677359	60,9061791	57,6830515	2966,63	41,15	441,65	41,15
7	257	+	18,09	72	+	478	5158,09	-23,078666	-45,656886	-23,078557	-45,656708	60,9061791	54,5380902	58,5183828	15,77	23,19	208,62	23,19
8	262	+	15,77	72	+	576	5255,77	-23,078047	-45,655992	-23,077911	-45,655858	54,5380902	71,7541455	44,5755946	97,67	21,21	71,14	21,38
9	263	+	6,41	72	+	586	5266,41	-23,077881	-45,655767	-23,077587	-45,655320	71,7541455	236,7215868	56,6663557	10,65	59,45	4,06	11,69
10	265	+	13,59	72	+	634	5313,59	-23,077820	-45,655675	-23,077520	-45,654938	236,7215868	42,8974279	67,8509424	47,18	88,41	5,46	18,48

Do Autor (2023)

As declividades das tangentes foram determinadas pela razão entre a diferença de altitudes dos extremos dos segmentos iniciais de possível aceleração divididos pela correspondente extensão, no ambiente *Google Maps*. A definição destes pontos extremos é feita entre os PT e PC de duas curvas horizontais sequenciais consideradas. A Figura 25 apresenta esta forma de obtenção da declividade longitudinal da primeira fase de cada segmento.

Figura 25 – Determinação da Declividade de Tangente pelo Google Maps



Fonte: *Google Maps* (2023)

Foram desprezadas as curvas horizontais de raio muito elevado e desenvolvimento reduzido, pelo fato de que veículos tendem a passar por estas como se uma fosse uma reta, mantendo alta velocidade ou ainda acelerando. O Critério de lançamento das tangentes totais está associado a este princípio, com método escolhido de imposição das tangentes totais de forma a permanecerem dentro da largura da “plataforma” oferecida pelo aplicativo, visando homogeneidade

de lançamento e possibilidade de reprodução. O traçado de 200 m entre duas curvas horizontais consideradas, presentes na Figura 25, ilustra uma curva horizontal desprezada, entre os extremos considerados.

Outros métodos poderiam ser adotados para a determinação de raios e tangentes a partir de dados abertos. O programa *Road Curvature Analyst Software* (ROCA), segundo Bil et al. (2018), embasado no Teorema de Bayes, conhecido na atualidade por Distribuição Binomial, poderia aferir a precisão de um dado de prévio conhecimento sobre sua probabilidade de ser realmente representante de determinada amostra ou classe. Ambientes virtuais como o do *Cloud Compare*, facilitariam o estabelecimento das coordenadas com rigor, servindo para comparar o nível de erro dos dados obtidos.

No entanto, como a geometria está sujeita às dispersões de raios horizontais, acarretando variações na extensão de tangentes, esta abordagem poderá colaborar em outras pesquisas, na concepção de aplicativos que possam prever o risco operacional em um dado trecho, considerando-se a acidentologia passada, velocidade e aspectos da geometria que o motorista terá que cumprir nos próximos instantes da viagem.

A obtenção da superelevação das curvas horizontais, que corresponde à declividade transversal, exige medições de desnível entre pontos muito próximos, transversais à plataforma. Este procedimento não pode ser efetivado pelos dados dos ambientes *Google Maps* ou *Google Earth*, pelo fato de que a resolução espacial das informações tende à nulidade de desnível entre pontos a pouca distância. Para tanto, buscou-se verificar a possível contribuição de medições a partir de imagens do *Google Street*.

A Figura 26 apresenta imagem obtida pelo *Google Street* da curva sucedânea de uma dada tangente ou segmento de possível aceleração relativo à Figura 25, na descida da Serra, da SP 98. Para a estimativa da superelevação referente à curva horizontal da rodovia, posicionou-se a imagem de forma que a linha do horizonte se mantivesse acima da plataforma, em altura equivalente à da objetiva da câmera fonte da imagem. Para tanto, a reta horizontal, representativa da linha do horizonte, deve cruzar o ponto de interseção do prolongamento das linhas dos bordos da pista, denominado, em desenho perspectivo, de ponto de fuga.

Para a estimativa da superelevação da curva presente na Figura 26, lançou-se, em seguida, uma outra reta horizontal, a partir da extremidade do bordo externo

da curva, no ponto **A**, até que atingisse a posição vertical sobre o bordo interno da curva, denominado de ponto **B**. Em seguida, traçou-se uma linha vertical até atingir a faixa de bordo interno da curva, no ponto **C**. Dividindo-se as extensões **BC** por **AB** tem-se um valor de declividade transversal, que se buscou avaliar como sendo a superelevação.

Figura 26 – Técnica de Estimativa da Superelevação



Fonte: *Google Street* (2023). Adaptado pelo Autor.

3.3.2 Obtenção dos Dados de Geometria Em Desenhos de Rodovias

As magnitudes das extensões e declividades das partes iniciais dos segmentos de estudo, compostos por retas e, eventualmente, com curvas “abertas”, as de raios elevados e extensões reduzidas, foram obtidos diretamente do desenho da rodovia, em processo de leitura de estacas, extensões e cotas disponíveis; ou gráfico, com mensurações efetuadas diretamente sobre os desenhos, com régua ou de acordo com escala gráfica eventualmente disponível. O processo adotado para se levantar os raios seguiu método idêntico. As extensões de raio variável, na forma de espirais precedentes ou sucedâneas de curvas horizontais bem como de outras curvas não circulares não foram consideradas neste trabalho, em face de modelos considerados neste trabalho, compostos exclusivamente por tangentes e curvas circulares. A geometria adotada é binária, composta apenas por estes dois elementos, facilitando as análises de traçados onde, em planta, tem-se parte onde

não se imponham restrições de velocidade, por aceleração centrípeta bem como em outras onde a presença de curvas de raio reduzido exija menor velocidade, para se manter o percurso viário dentro da faixa de tráfego. Portanto, curvas de transição, comuns nas rodovias de projetos mais recentes, não são consideradas nesta abordagem. Realça-se que, em rodovias antigas, é comum a ocorrência de trechos onde há sinuosidade horizontal que não se caracteriza por inserções de curvas de raio variável e sim de ato de minimização de volumes de corte e aterro.

O método de obtenção das deflexões do alinhamento é analítico, considerando a diferença de azimutes, quando disponíveis. Quando indisponíveis, optou-se por mensuração com transferidor, com arredondamento em graus inteiros, sobre as tangentes prolongadas, obtendo-se o ponto de inflexão do alinhamento. As declividades longitudinais foram calculadas pelo quociente entre diferenças de cotas de pontos extremos pela distância dessas referências. A superelevação segue procedimento idêntico: divisão da diferença de cotas entre bordos pela largura da pista.

Caso o desenho da rodovia apresente alinhamento continuamente variável, sem informações específicas de extensões de raios e locação de pontos iniciais e finais de curvas; adota-se extensão da parte inicial de cada segmento por critério de desprezar deflexões de até 5 graus, como critério inicial, com desenvolvimento reduzido. Esta premissa visa considerar como parte inicial de cada segmento aquela em que o veículo possa manter a velocidade ou acelerar.

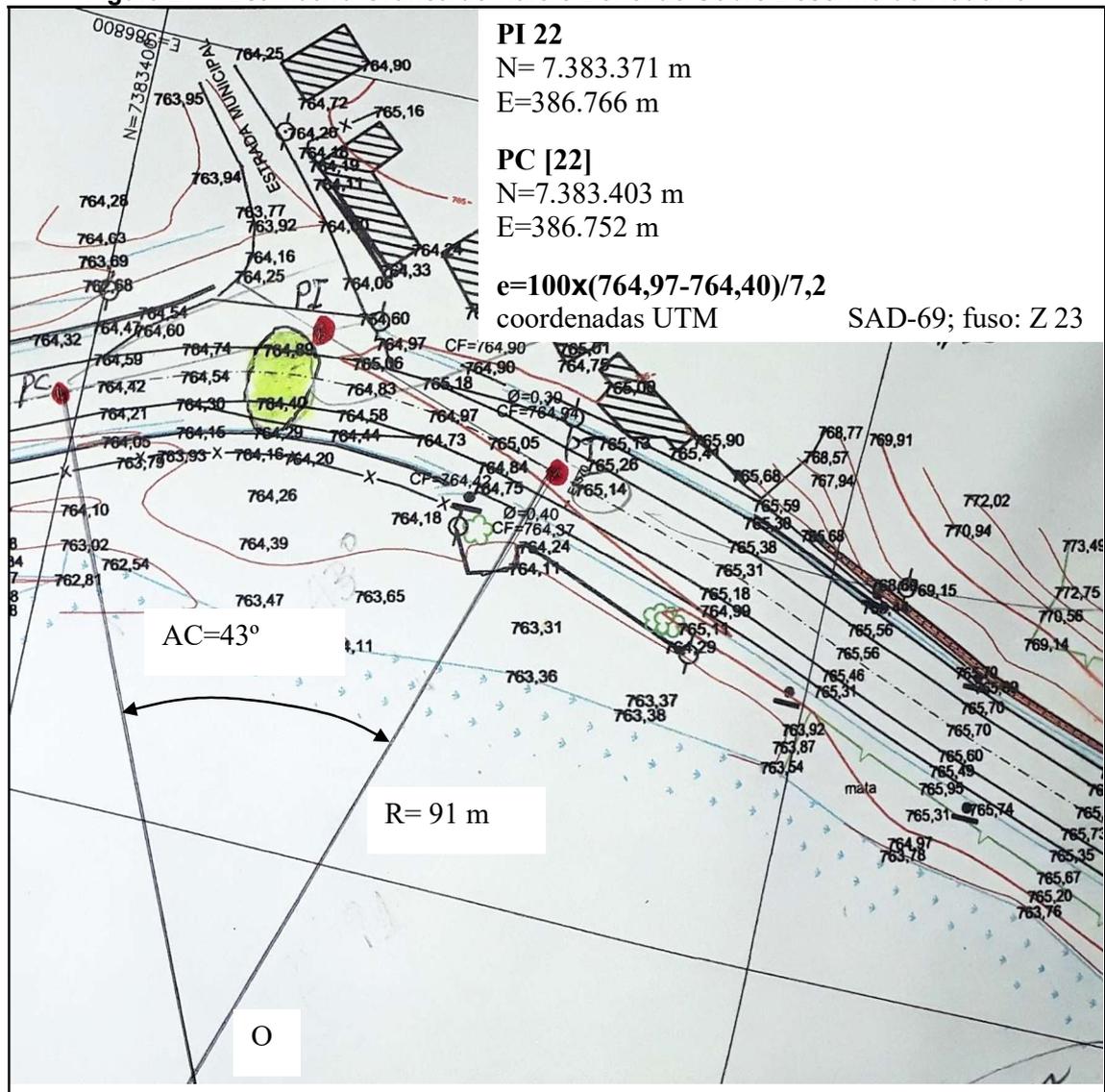
Desenhos de rodovias que tenham sido concebidos para serem projetos de implantação devem ser atualizados com as alterações subseqüentes, para que se tornem *as built* da via. Estes desenhos normalmente apresentam informações geométricas que facilitam a obtenção dos dados, em relação a desenhos de rodovias antigas, que não necessariamente informam os elementos que auxiliam na implantação. Assim, curvas de raios de grande magnitude em traçado sinuoso podem simplesmente compor estes desenhos sem informações como raio ou extensão do trecho circular, exigindo adotar método de obtenção destas informações segundo tratamento gráfico ou analítico.

Ilustra-se o processo gráfico de estimativas de raios circulares segundo a Figura 27, que apresenta o desenho da primeira curva horizontal do trecho serrano da SP 98. Os pontos PC e PT do trecho circular foram localizados a partir dos pontos onde a curva se afasta das tangentes, formadas por retas estendidas sobre o

desenho. Foram lançadas perpendiculares nestes pontos, determinando-se o centro da curva. Medições em escala foram efetivadas para a determinação do raio e da extensão de tangente anterior. O ângulo da deflexão, igual ao ângulo central da curva, também foi determinado por processo gráfico.

O acervo dos desenhos (as built) e dados completos sobre sinistros dos trechos analisados da SP 98 e de outras rodovias analisadas foi cedido pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo; em resposta a uma carta de solicitação de apoio técnico para pesquisa, pela Chefia do Departamento de Infraestrutura e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, em 24 de abril de 2023.

Figura 27 – Estimativa Gráfica de Raio e Deflexão Sobre Desenho de Rodovia



Fonte: DER/SP, Adaptada pelo Autor (2023)

A Tabela 7 reproduz parte dos dados da planilha Excel, utilizada para processar os elementos do trecho serrano da SP 98, nos primeiros dez segmentos. As colunas com os ângulos centrais (ACs), extensões de tangentes entre curvas horizontais (L) e raios horizontais (R) foram obtidas por medições no desenho da via. As medições foram arredondadas para graus e metros inteiros. As declividades das tangentes precedentes às curvas foram calculadas e arredondadas com uma casa decimal em porcentagem, mesmo procedimento adotado para a superelevação medida no centro de cada curva horizontal, em função de variações típicas de diagramas de superelevação e coerente à precisão dos dados.

Tabela 7 – Elementos Dos Dez Primeiros Segmentos da SP 98

km de cada											km do PC:		km do PT:	
PC de acordo com as Coordenadas Do Desenho da rodovia		AC	L	i	R	D	e	Lac		calculado pelos dados da tabela:		calculado pelos dados da tabela:		
PCi:	km	(o)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)	até PC:	km	m	km	m		
0	67 .+ 380,000								67 .+ 380,000					
1	67 .+ 567,366	66	100	1,2	115	132,5	6,9	100,0	67 .+ 480,000		67 .+ 612,470			
2	67 .+ 843,604	99	130	-	76	131,3	7,4	362,5	67 .+ 742,470		67 .+ 873,789			
3	67 .+ 993,398	31	78	3,5	-	89	48,2	7,1	571,8	67 .+ 951,789	67 .+ 999,943			
4	68 .+ 231,922	55	150	2,7	-	116	111,4	7,9	769,9	68 .+ 149,943	68 .+ 261,295			
5	68 .+ 435,840	14	132	3,8	-	246	60,1	2,5	1.013,3	68 .+ 393,295	68 .+ 453,404			
6	68 .+ 819,237	31	320	1,6	83	44,9	6,9	1.393,4	68 .+ 773,404	68 .+ 818,311				
7	68 .+ 994,893	72	93	3,1	-	72	90,5	8,6	1.531,3	68 .+ 911,311	69 .+ 1,789			
8	69 .+ 138,642	47	21	3,5	-	158	129,6	3,2	1.642,8	69 .+ 22,789	69 .+ 152,397			
9	69 .+ 403,696	21	171	4,0	-	238	87,2	5,4	1.943,4	69 .+ 323,397	69 .+ 410,629			
10	69 .+ 626,712	8	165	5,3	255	35,6	3,6	2.195,6	69 .+ 575,629	69 .+ 611,233				

Do Autor (2023)

O desenvolvimento de cada curva (D) foi calculado pelo produto entre o ângulo central (AC) e o raio (R). Há coluna com o comprimento acumulado de tangentes e desenvolvimentos (L_{ac}), para a estimativa de posição de cada PC e PT, em formato de marcos quilométricos. As coordenadas do desenho foram utilizadas para a determinação da posição de cada ponto, em termos de PC e PT, de quilometragem inteira e de distância complementar em metros. Os dados de

referência dos pontos também foram calculados por processo matemático direto na planilha, com verificação de possível erro de extensão total.

3.4 Critério de seleção de tipos de acidentes e acervo

Para as correlações entre elementos da geometria rodoviária e acidentes, optou-se por utilizar números absolutos de sinistros e de tipos de acidentes em vez de índices, nas fases de testes e de validação de modelos de estudo, para otimizar o tempo de pesquisa. Após a elaboração das correlações matemáticas, correlações dos índices de risco em função da geometria devem ser associados a índices de acidentes e de severidade, para aplicações práticas. Os índices correspondem a grandeza derivada dos acidentes, por isso, as melhores correlações matemáticas com os bancos de dados utilizados de forma absoluta devem gerar correlações de qualidade equivalente, quando se aplicam índices.

Foram analisadas 3 fontes de bancos de dados de acidentes rodoviários: o Sistema de Informações Gerenciais de Acidentes de Trânsito do Estado de São Paulo (DETRAN-INFOSIGA, 2022), os dados abertos da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2023) e arquivos consolidados de dados de acidentes oferecidos pelo DER-SP. Os acidentes de rodovias federais também estão disponíveis no DATATRAN (BRASÍLIA, 2019), permitindo outro acesso ao banco de dados da ANTT. Os dados do INFOSIGA foram considerados insuficientes, por não indicar dados amplos dos acidentes nem referências rodoviárias dos locais dos sinistros.

Do banco de dados oferecido pelo DER, segregou-se o grupo de acidentes ocorridos entre 2009 e 2018, com ou sem vítima, para o trecho da SP 98. Em planilhas eletrônicas, foram mantidos os acidentes por tipo de veículo e os totais de feridos, mortos e de veículos em geral. Este acervo, bem como os dados de desenho do trecho da rodovia, foi cedido pelo DER/SP.

No [Anexo A](#), tem-se informações mais detalhadas a respeito dos mapas de acidentes da SP 98 e da BR 116 Rio-Teresópolis.

Para o trecho selecionado da BR 116, entre Teresópolis e Guapimirim, utilizou-se do banco de dados da ANTT, referente aos acidentes ocorridos entre

2009 a 2018, tratando-os de forma semelhante ao trecho da SP 98. Foram desconsiderados acidentes onde não havia citação do local de ocorrência.

O trecho serrano da BR 116 entre Teresópolis e o Rio de Janeiro está situado exclusivamente no município de Guapimirim. Para o trecho, 20 acidentes do total de 669 com vítima, equivalentes a 3%, não têm anotação do local do evento, que se subentende não ser porcentagem que possa influenciar de forma significativa os resultados. Contudo, como o banco de dados de acidentes com vítima relativos a este trecho apresentou volume reduzido em comparação ao trecho serrano da SP 98, buscou-se avaliar os com acidentes sem vítima da BR 116, para o tipo de acidente denominado “tombamento”. A parcela desconsiderada de acidentes sem vítima em função da não anotação do local do acidente, no período entre 2009 a 2018, foi de 36 sinistros em total de 1081, equivalente a 3,3%.

Os dados de acidentes foram classificados quanto ao local de ocorrência. A precisão da informação é predominante apenas quanto ao quilômetro. Este fato tende a gerar discrepâncias na associação de cada acidente com um dado segmento, pelo fato de que não se tem disponível o local exato das ocorrências.

3.5 Sistemática de processamento de dados

O processamento de dados geométricos e de acidentes rodoviários foi efetivado em planilhas eletrônicas, considerando as rotinas matemáticas de acordo com as expressões dos modelos propostos. Os dados dos segmentos de tangentes e curvas horizontais foram levantados a partir de trechos selecionados com base de dados abertos e de desenho da via. Cada linha das planilhas elaboradas foi estabelecida para um segmento tangente-curva.

Cada segmento foi associado a acidentes ocorridos em locais próximos, dada a referência de posição ter anotação apenas do quilômetro, em geral. Este processo gerou ação que não garantia, efetivamente, a associação dos acidentes com os segmentos que poderiam ter influenciado na geração do sinistro. Isto foi agravado entre marcos quilométricos com várias curvas horizontais.

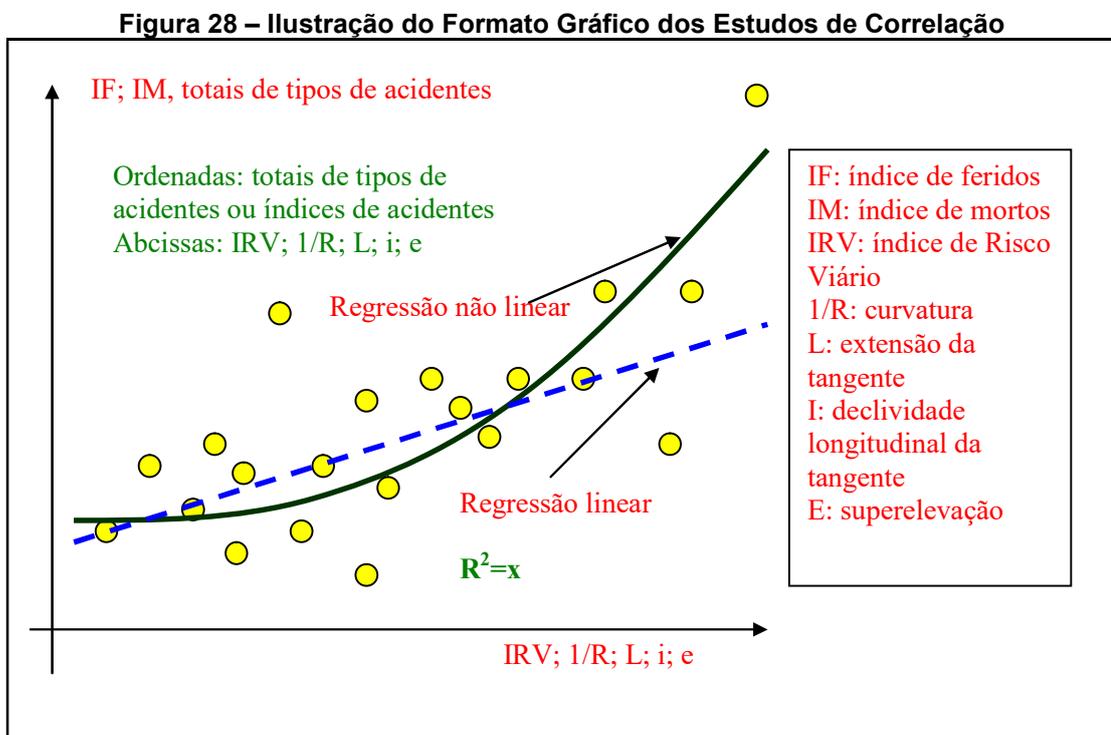
A análise estatística posterior, entre os dados geométricos e os acidentes, analisados sob os modelos de estudo, confirmou a alta dispersão entre pares de valores quanto ao coeficiente de determinação. Posteriormente, passou-se a

associar os acidentes com grandezas geométricas, agrupadas por quilômetro. Na prática, os valores tanto médios como limites da geometria foram considerados, visando obter melhor resultado correlacional quanto à discretização quilométrica.

A velocidade considerada nos estudos foi, inicialmente, a média amostral coletada em campo. Contudo, em fase posterior, optou-se por considerar a velocidade permitida como referência ou como velocidade inicial, no intuito de estabelecer melhores correlações.

3.6 Apresentação Gráfica das Regressões

Os resultados são apresentados em gráficos, com inserção da equação correlacional, tipo de regressão dos dados e coeficiente de correlação. A apresentação gráfica considera as grandezas isoladas ou integradas, na forma de índice de risco, segundo os modelos propostos e as quantidades de tipos de acidentes, ou ainda, sob índices de severidade. A apresentação genérica dos gráficos está na Figura 28.



Fonte: Do Autor (2021)

A aceleração centrípeta é parâmetro oculto nas análises, por se tratar de estudo de abordagem indireta desta grandeza cinemática. Os parâmetros utilizados nas relações matemáticas geram maior velocidade de entrada nas curvas o que acarreta a necessidade de maior aceleração centrípeta na curva subsequente. Quando se consideram índices que sejam proporcionais ao quadrado da velocidade tomada como referência, dividida pelo raio de curvatura, obtém-se, indiretamente, a aceleração centrípeta do movimento estudado no segmento.

A análise integrada da potencialidade de risco de acidentes rodoviários quanto à geometria foi denominada de Índice de Risco Viário em Curvas Horizontais (IRV), para distintas condições. A frequência de acidentes com ou sem vítimas foi considerada como fundamental para a busca das melhores correlações. Os valores de IRVs são calculados pelas equações dos modelos propostos.

O motorista faz parte da análise, quando a coibição do excesso de velocidade estará presente onde o IRV seja maior. Pode-se aplicar esta modelagem para verificar possível obsolescência viária. Motoristas acostumados a vias com melhor geometria podem estar sujeitos a maior risco operacional em outra com maior quantidade de locais onde a exigência de aceleração centrípeta seja maior. Ao se deparar com a primeira curva mais fechada, estando em alta velocidade, terá que usar toda a força de aderência na curva, em movimento de iminência de perda de controle e resultados possíveis de elevada gravidade.

3.7 Modelo Cabo de Guarda-Chuva

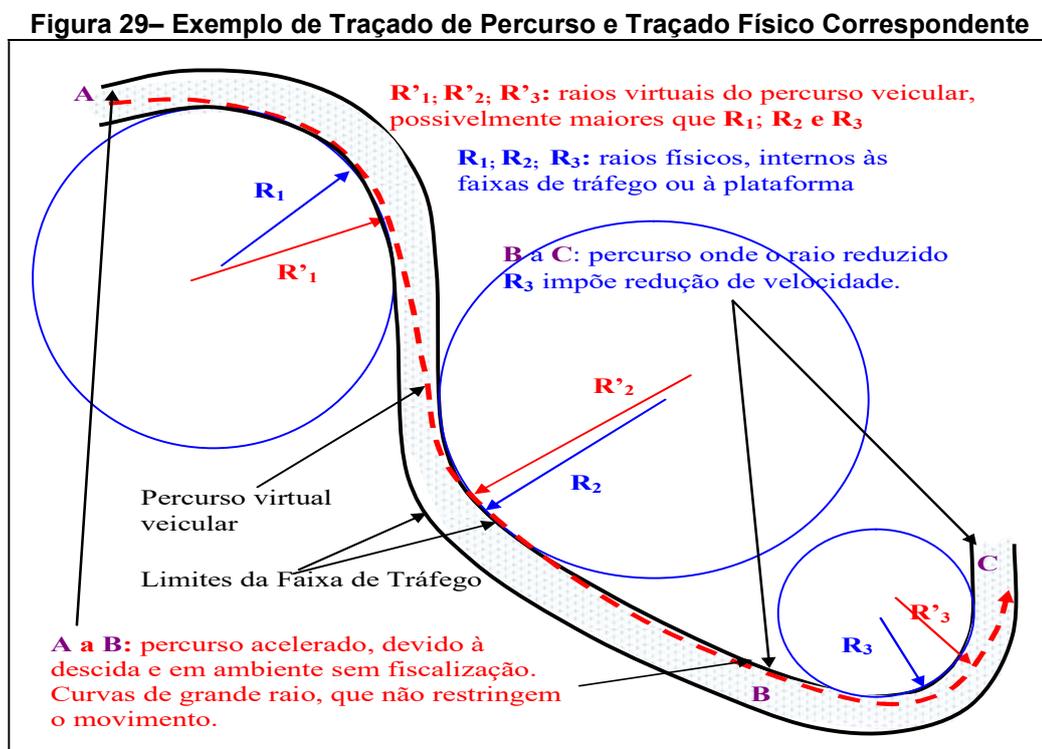
Elaborar estudos e análises de segurança rodoviária a partir de determinados elementos geométricos, tais como a extensão e a declividade de tangentes precedentes a curvas horizontais, que, por sua vez, são associados a raios e superelevações correspondentes, gera abordagem com base na aceleração centrípeta, de forma indireta. Esta, por sua vez, se associa ao coeficiente de atrito transversal pneu-pavimento, que, mesmo não sendo necessariamente determinado de forma específica para cada curva, tende a ser parâmetro de relação indireta entre dados geométricos e acidentes.

Veículos tendem a acelerar mais, quanto maior a extensão e declividade das tangentes verticais precedentes a curvas horizontais. Ao atingir uma curva

horizontal, podem estar em velocidade superior à de segurança, caracterizando ponto de possível maior concentração de acidentes. O balizamento vertical que indica a alteração de traçado à frente não é suficiente para se manter a segurança operacional.

Nos Estados Unidos da América (EUA), a maior causa de mortes é devida a colisões veiculares, indicando a importância de ações mitigadoras específicas. Um dos problemas que podem contribuir nesta grave questão corresponde ao insuficiente volume de estudo em curvas rodoviárias, em função de restrição orçamentária (Hu et al., 2010).

IRVs estabelecidos para trechos rodoviários, devidamente segregados em segmentos de tangentes e curvas horizontais, com grandezas físicas analisadas de forma integrada, podem gerar correlação de boa qualidade a bancos de dados de acidentes ocorridos em pontos próximos (Peixoto; Françoso, 2021). A geometria do traçado do percurso não é necessariamente igual à da via, conforme mostrado na Figura 29.

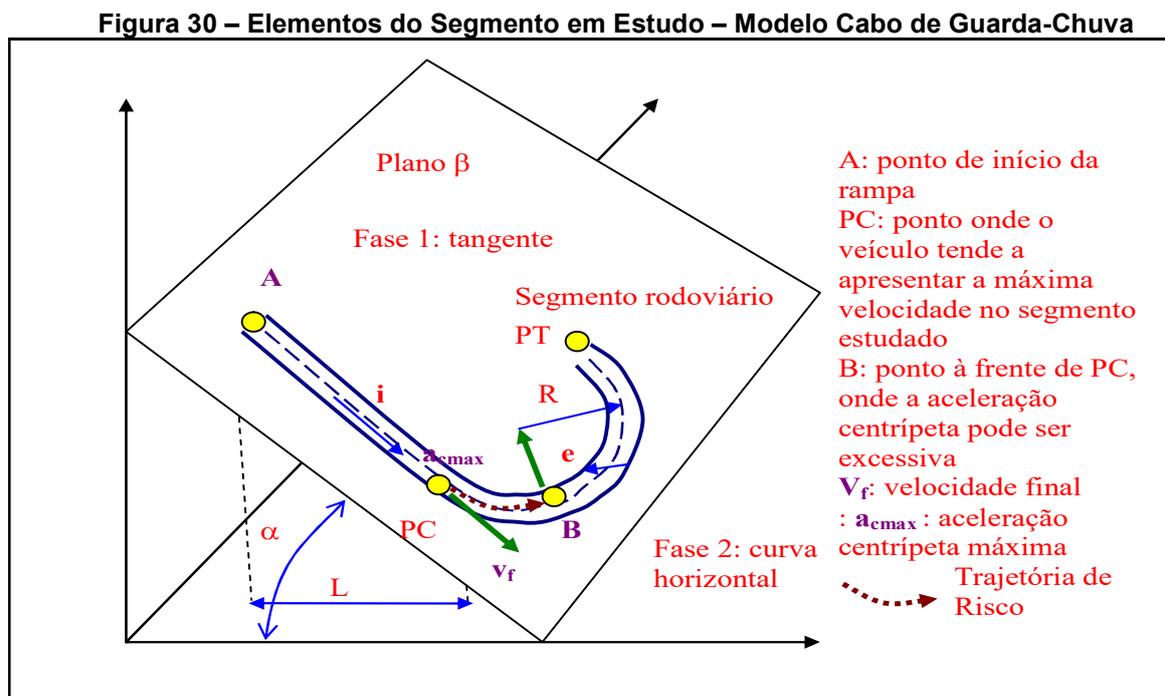


Fonte: Do Autor (2021)

A Figura 29 ilustra um segmento de traçado rodoviário, onde os raios da trajetória veicular, R'_1 ; R'_2 ; R'_3 são possivelmente maiores que os raios físicos, R_1 ; R_2

e R_3 em função da busca do motorista em “suavizar” o percurso, quando em velocidade excessiva. Não há, portanto, nesta abordagem, imposição de rigor típico de projetos, em face da liberdade do movimento. O conceito deste traçado, de uma possível tangente de aceleração seguida por curva de raio reduzido, foi desenvolvido nesta pesquisa para buscar responder à hipótese do trabalho, tendo sido denominado Modelo Cabo de Guarda-Chuva, pelo Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva (FECFAU/UNICAMP).

O Modelo Cabo de Guarda-Chuva, segundo a Figura 30, apresenta o plano inclinado β , de um segmento viário, onde se insere a tangente de extensão L e declividade α , com os pontos **PC** e **PT**, respectivamente, de início e término da curva horizontal subsequente à tangente, de raio R e superelevação e .



Fonte: Do Autor (2021)

A parte final da curva se apresenta em subida, no plano inclinado de referência, fato que não influencia nas análises devido à posição provável do ponto crítico B antes da reversão da declividade para active. A extensão entre os pontos **A** e **PC** corresponde à fase de possível aceleração. Em **PC**, tem-se o ponto onde se inicia a exigência da aceleração centrípeta. O segmento entre **PC** e **B** é o de imposição de ações que podem acarretar a desestabilidade do veículo. O ponto **B** é o de efetivação da desestabilidade sob derrapagem, tombamento ou capotamento.

Entre **PC** e **PT**, tem-se a fase de imposição de redução de velocidade ou de manutenção desta, sob influência da aceleração centrípeta.

O IRV apresenta expressões matemáticas com grandezas integradas, visando levar em conta a influência de possível interdependência, não apresentando parcelas independentes. As propostas de correlações entre grandezas estão expressas nas Equações 12 a 15. A Equação 12 tem por premissa a determinação do IRV com abordagem livre de deduções de Física Clássica e para uma dada velocidade (IRV_L).

A abordagem conceitual da Equação 12 leva em conta a inserção de fatores e suas correlações sob conjectura de influência, a ser avaliada quanto às regressões. O quadrado da velocidade e o raio estão considerados de forma a dar relação diretamente proporcional entre IRV_L e aceleração centrípeta. A extensão de tangente precedente à curva horizontal indica relação direta com o IRV, pelo fato de facilitar o aumento de velocidade. Quanto maior esta extensão, maior a probabilidade de que o motorista aumente a velocidade. A declividade longitudinal gera fator multiplicativo: quanto maior a declividade em descida, que tem valor negativo, maior será o risco de ocorrência de maiores velocidades. Quanto maior a superelevação, maior deve ser a parcela de aceleração centrípeta compensada pela via, minimizando o risco.

$$IRV_L = k \times V^2 \times \frac{T_A}{R} \times \left(1 - \frac{i}{100}\right) \times \left(1 - \frac{e}{100}\right) \quad (12)$$

Em que:

IRV_L : índice de risco viário sob relações livres, considerando a velocidade.

v: velocidade considerada (m/s)

T_A : extensão da tangente anterior (m)

R: raio horizontal da curva de jusante (m)

i: declividade longitudinal da tangente (%)

e: superelevação (%)

k: fator de normalização numérica

A Equação 13, do IRV_C , com base científica, tem sua magnitude diretamente proporcional ao coeficiente de atrito lateral, que gera a aceleração centrípeta descompensada. Esta, por sua vez, é o produto entre a aceleração da gravidade e a superelevação.

$$IRV_C = k \times ft = k \times \frac{V^2}{g} \times \frac{1}{R} - e \quad (13)$$

Em que:

IRV_C : índice de risco viário, com abordagem científica, considerando a velocidade.

f_t : coeficiente de atrito lateral

v : velocidade (m/s)

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

R : raio horizontal da curva de jusante (m)

e : superelevação (m/m)

k : fator de normalização numérica

Quando f_t se iguala ao coeficiente de atrito transversal máximo (f_{tmax}), concebe-se ambiente de iminência de derrapagem lateral, com perda do controle e acidente em seguida.

A Equação 14 tem por premissa a determinação do IRV com abordagem livre quanto a deduções das Leis da Física, considerando apenas as grandezas tomadas como principais, sem associá-las à velocidade. Neste modelo, avalia-se apenas o cenário de risco, sem se considerar a velocidade (IRV_{LG}). A inserção de fatores e suas correlações estão novamente sob conjectura de influência.

$$IRV_{LG} = k \times \frac{T_A}{R} \times \left(1 - \frac{i}{100}\right) \times \left(1 - \frac{e}{100}\right) \quad (14)$$

Em que:

IRV_{LG} : índice de risco viário, sob abordagem livre, desconsiderando a velocidade

T_A : extensão da tangente anterior (m)

R : raio horizontal da curva de jusante (m)

i : declividade longitudinal (%)

e : superelevação (%)

k : fator de normalização numérica

Pela Equação 15, determina-se IRV sob princípio científico, entre raio e superelevação, de forma análoga à Equação 14: sem considerar a velocidade. Neste modelo, o cenário de risco é distinto do relativo à Equação 14, por não considerar a extensão da tangente anterior e sua declividade, nem a geometria que possivelmente imponha maior velocidade. Não se considera a velocidade nesta equação.

$$IRV_{CG} = k \times \left(\frac{1}{g \times R} - e \right) \quad (15)$$

Em que:

IRV_{CG} : índice de risco viário, sob embasamento científico; sem velocidade

R : raio horizontal da curva de jusante (m)

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

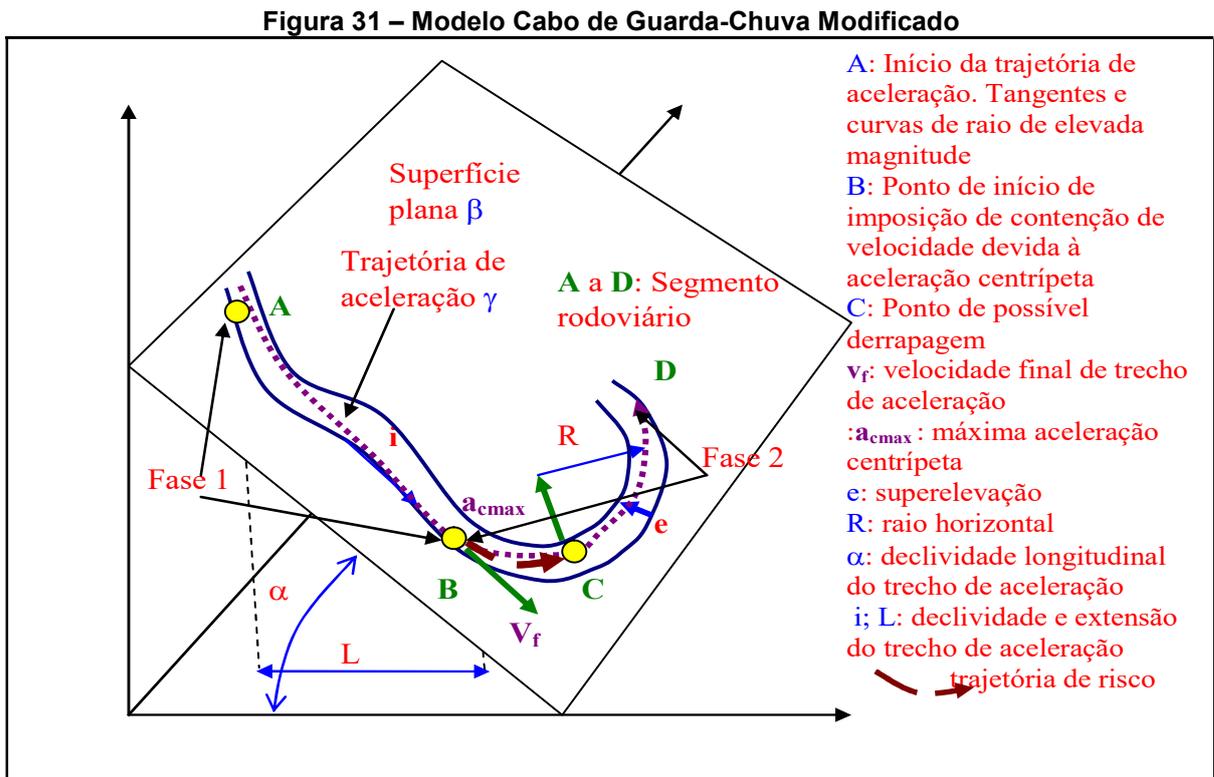
e : superelevação (%)

k : fator de normalização numérica

Em planilha eletrônica, pares de valores de acidentes ou índices de acidentes ocorridos nas curvas horizontais de cada segmento ou próximos delas foram associados aos valores correspondentes de IRVs ou de outras grandezas geométricas.

3.8 Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado

O Modelo cabo de Guarda-Chuva foi modificado neste trabalho, correspondendo a uma evolução do modelo original; onde a Fase 1, de tangente inicial de possível aceleração passa a ser composta por segmentos de reta e curvas horizontais “abertas”; que não impõem restrição à velocidade. Em seguida, tem-se a Fase 2, onde o veículo atinge curva horizontal de raio reduzido, conforme a Figura 31 (Peixoto et al, 2023), a restringir a velocidade.



Fonte: Peixoto et al (2023)

Esta modificação foi concebida após avaliações de velocidade em alguns segmentos rodoviários. Veículos apresentavam aumento de velocidade mesmo ao longo de curvas horizontais de raio de elevada magnitude. Este modelo exige

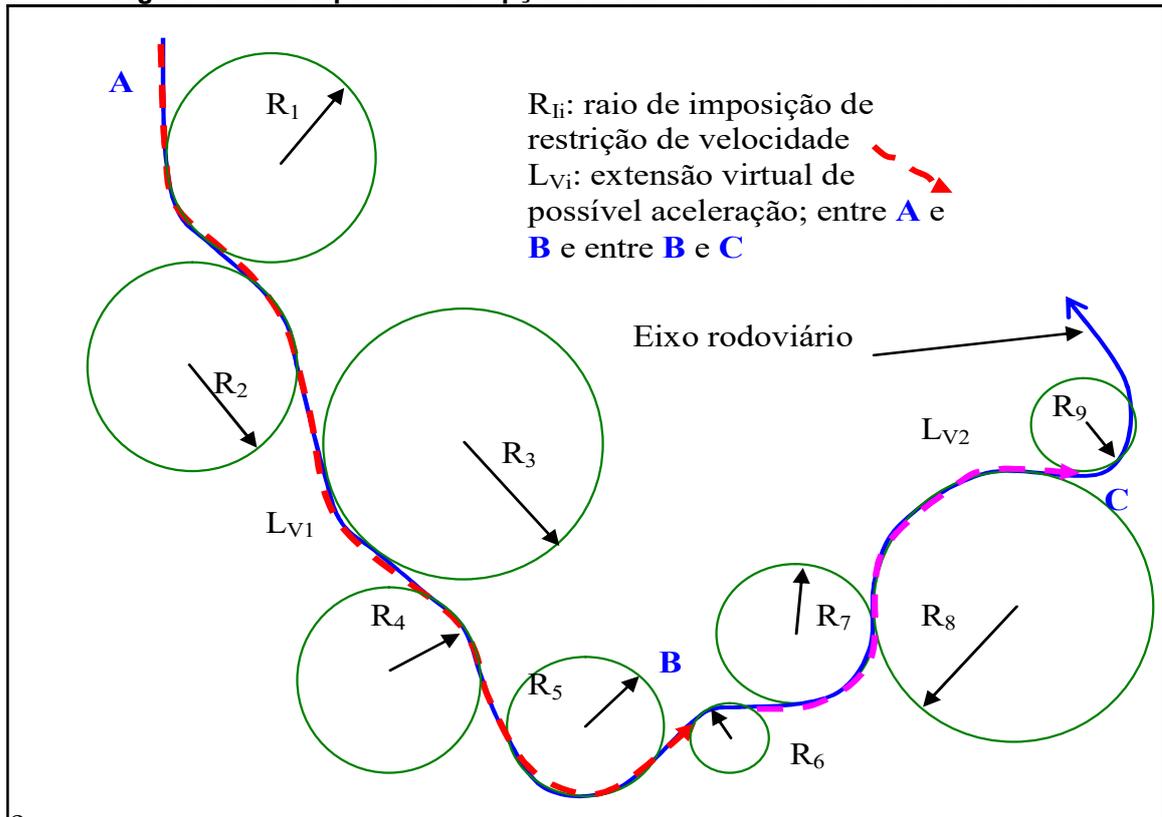
analisar a velocidade ao longo de cada segmento, composto por tangentes e até por curvas abertas, até que se atinja uma dada curva que imponha restrição de velocidade. Esta curva, onde a velocidade passa a ser contida, deve ser analisada quanto a uma dada magnitude crítica

A Equação 12 do Modelo Cabo de Guarda-Chuva apresenta uma relação diretamente proporcional entre o IRV_L e a extensão da tangente precedente à curva horizontal de determinado raio, sem restrição de extensão e sob abordagem livre entre as grandezas. Quando foram aplicados testes estatísticos com diversos tipos de acidentes, os coeficientes de correlação obtidos foram de magnitude reduzida. Para aprimorar, buscou-se analisar a extensão de possível aceleração. A suposição original de tangentes muito longas sob premissa de movimento continuamente acelerado não se apresentou como representativa dos deslocamentos reais. Outro problema é a ocorrência de movimentos com aumento da velocidade em curvas de raios elevados. Em uma dada curva horizontal, quanto menor a deflexão e maior o raio, maior será a facilidade de uso da largura extra da faixa de tráfego para efetuar percurso de raio maior, suavizando o traçado e permitindo aumento de velocidade, mesmo em curva horizontal.

Para minimizar essas deficiências, o Modelo Cabo de Guarda-Chuva foi modificado, introduzindo um critério de raio máximo que ainda imporia restrição de velocidade. No exemplo de percurso apresentado na Figura 32, tem-se aceleração contínua entre os pontos A e B, apresentando cinco curvas horizontais de raios elevados e imposição de contenção do movimento na curva de raio R_6 . Em sequência, outro percurso de aceleração entre B e C, com imposição de contenção na curva de raio R_9 .

Para se estabelecer o trecho de curvas de maior raio e tangentes onde seja possível acelerar, inicialmente tentou-se estabelecer um retângulo externo ao trecho em planta composto por tangentes e curvas de grande raio, visando estabelecer o trecho com maior liberdade de aceleração. Quando uma dada curva cruzasse a fronteira deste retângulo, ter-se-ia a curva crítica, onde se consideraria início de restrição de velocidade. Este método foi abandonado, por não gerar valores de IRVs que apresentassem boa correlação matemática com os acidentes ocorridos em cada segmento.

Figura 32 – Exemplo de Concepção do Cabo de Guarda-Chuva Modificado



Fonte: Do Autor (2023)

Para a análise de cada curva horizontal, utilizou-se de uma relação que foi denominada de Número Limite da Restrição de Aceleração em Curvas (N_{LIM}), correspondente à relação entre o desenvolvimento da curva (D) dividido pelo quadrado do raio (R^2). Como o ângulo da deflexão em radianos (AC_{rad}) multiplicado pelo raio é igual ao comprimento do trecho circular, denominado desenvolvimento (D), substituindo AC por D/R , deduz-se a Equação 16, da condição de restrição da aceleração ou não em curvas, válida para qualquer sistema coerente de unidades. Variando-se o N_{LIM} enquanto se busca maximizar o coeficiente de determinação de uma dada correlação entre acidentes e IRV, determinam-se os raios críticos, que limitam o trecho de aceleração.

$$\begin{aligned}
 N_{LIM} &= \frac{AC_{rd}}{R}; \text{ com: } AC_{rd} \times R = D \Rightarrow AC_{rd} = \frac{D}{R} \\
 N_{LIM} &= \frac{AC_{rd}}{R} = \frac{D}{R} \times \frac{1}{R} = \frac{D}{R^2}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

3.9 Modelo Arco-Íris

Denominou-se Modelo Arco-Íris o aprimoramento do Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado, onde se define uma trajetória de risco, concebida sobre o eixo da via e aplicado a segmentos compostos por tangentes e curvas de um trecho rodoviário, analisados sob premissas cinemáticas. O embasamento matemático visa determinar coeficientes numéricos associados à interação veículo-via e velocidades de referência do movimento, para o cálculo de valores de **IRV** que serão comparados aos dados de sinistros. Nas correlações, os acidentes deverão ser levantados em período de tempo em que a geometria da via não tenha sido alterada, quanto às grandezas associadas. No atual estado da arte, o trecho de estudo deve apresentar considerável extensão em descida, na forma típica de vias que cruzam regiões serranas. O sentido de estudo da rodovia é o da predominância com segmentos em descida.

A denominação Arco-Íris associa a ideia de que se trata de curva inesperada, em abordagem que busca analisar os mais distintos veículos rodoviários e tipos de acidentes, em alusão à visão inclusiva, humana e comportamental, oferecida pela Bandeira multi-colorida de Gilbert Baker (Pitman, 2018).

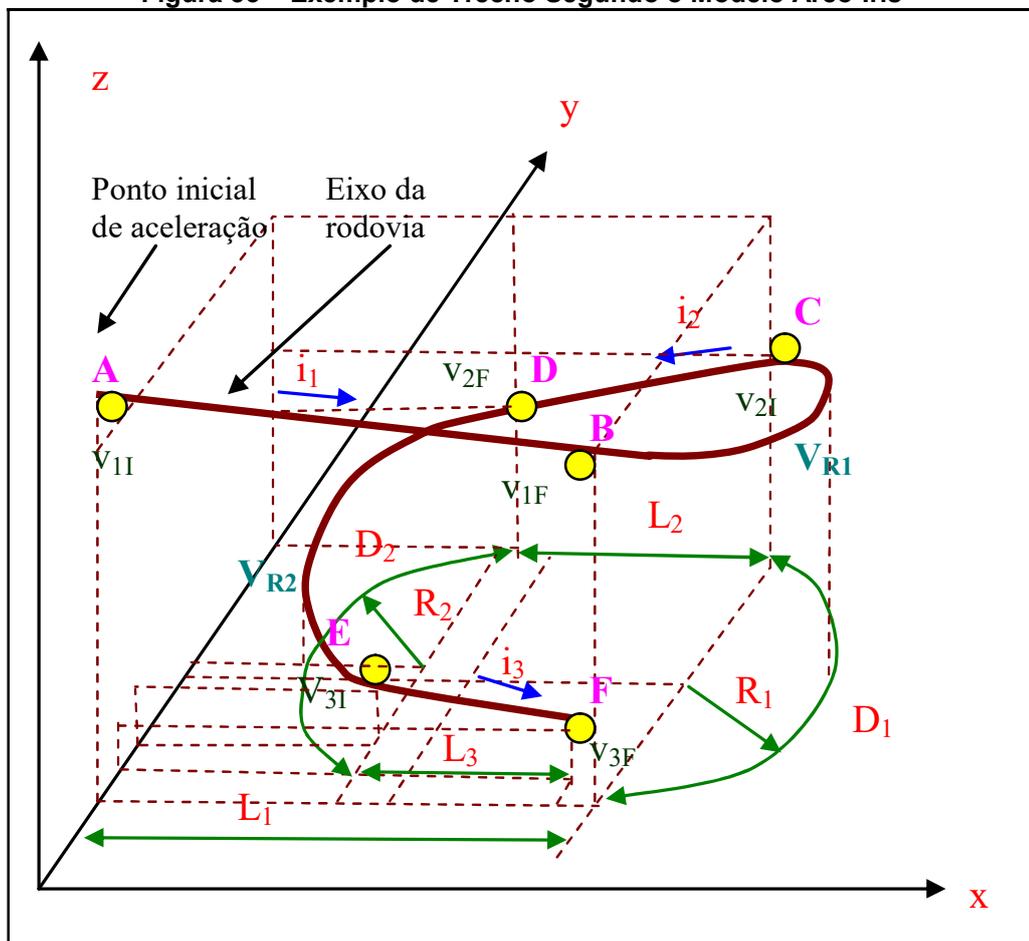
No Modelo, a trajetória de risco de um trecho rodoviário é composta exclusivamente por segmentos de tangentes e curvas circulares, a partir da simplificação do traçado da via. Não se consideram eventuais curvas de raio variável nem deflexões ou desenvolvimentos muito reduzidos de curvas horizontais de grandes raios, pelo fato de que o motorista que deseja acelerar tende a passar por estes locais como se fossem em tangente única. O grau de liberdade gerado pela largura extra da faixa de tráfego, em relação à largura dos veículos, permite flexionar a trajetória, suavizando raios horizontais e gerando linha de percurso contida pela geometria da via e pela largura da faixa, em configuração possivelmente distinta do traçado físico. A velocidade não aumenta ao longo das curvas horizontais de raios menores e desenvolvimentos maiores. Quando a curvatura é elevada, a força lateral sobre o corpo do motorista acarreta ações que o induzem a conter o movimento.

No ponto inicial do primeiro segmento do trecho, onde se inicia a primeira tangente, a velocidade é igual à permitida ou um valor adotado (V_P). A velocidade final na tangente (V_F) é igual à velocidade inicial (V_I) acrescida de parcela relativa à força peso, na direção do deslocamento, desde que esteja em declive. A V_F é igual à

Vi caso a tangente se apresente em subida ou em plano horizontal. A V_F é limitada pela velocidade de risco global (V_G), igual à V_P acrescida de uma determinada porcentagem de excesso, variável ao longo do processo de análise, visando obter melhores correlações entre os valores de IRVs e acidentes. Ao se limitar a V_F com a V_G , insere-se processo na avaliação dos movimentos, a partir de ato usual de motoristas, mesmo quando costumam viajar em velocidades superiores à permitida: o de acelerar até uma determinada velocidade, subentendendo-a como sendo a de “sua segurança”, em paralelo ao costume de buscar viajar a uma dada velocidade constante.

A V_i de tangente a um dado segmento é igual à V_F da tangente anterior, já verificada quanto à V_G e limitada também pela velocidade de risco em curva (V_R), que, por sua vez, é igual à menor dentre as velocidades máximas de estabilidade em curva (V_E) e de visibilidade em curva (V_v). Apresenta-se um exemplo de dois segmentos de um dado trecho, visando ilustrar o Modelo Arco-Íris, na Figura 33.

Figura 33 – Exemplo de Trecho Segundo o Modelo Arco-Íris



Fonte: Do Autor (2023)

A extensão da trajetória de risco (V_R) é cumulativa quanto aos comprimentos de tangentes e desenvolvimentos de curvas em sequência, enquanto a V_F não seja maior que V_R . Quando a V_F supera a V_R , inicia-se nova trajetória de risco. Nesta trajetória, os veículos aceleram até à iminência de desestabilização, quando ações de frenagem e de mudança de direção são impostas. No processo de busca da trajetória de risco que melhor associe os IRVs aos acidentes, testa-se distintos valores de excesso de velocidade, flechas de campo de visibilidade (M) e coeficientes de atrito longitudinal (f) e transversal (f_t) para se atingir o maior valor de coeficiente de correlação.

Os tipos de acidentes que se supõem ideais para as correlações se associam à de perda de controle veicular, tendo como consequência derrapagens, tombamentos ou capotamentos. Colisões com objetos fixos ou móveis podem ser analisadas, supondo-as resultantes de ações de desestabilização ou de reduzido campo de visibilidade em curvas. Testa-se grupos de dados tanto de acidentes com vítima como de acidentes sem vítima.

A aceleração longitudinal em tangente é proporcional à parcela da força-peso na direção do deslocamento, igual ao produto da declividade pela aceleração da gravidade; acarretando a V_F , segundo a Equação 17. Esta equação permite determinar a velocidade final (V_{iF}) de cada segmento i . A Equação 18 permite calcular a velocidade de estabilidade em curva (V_{Ei}) e a Equação 19 permite calcular a velocidade de segurança de visibilidade em curva (V_{vi}). A velocidade de risco em curva (V_R) é igual à menor destas duas velocidades.

$$v_{iF} = \sqrt{2 \times L_i \times g \times \text{tg}(\alpha) + v_{iI}^2} \quad (17)$$

Em que:

v_{iF} : velocidade final na tangente i (m/s)

L_i : comprimento da tangente do segmento i (m)

$\text{tg}(\alpha)$: declividade longitudinal da tangente do segmento i

v_{iI} : velocidade inicial na tangente do segmento i (m/s)

válida para qualquer sistema coerente de unidades

A Equação 18 foi deduzida a partir de forças sobre o veículo em curva e simplificada para a abordagem cinemática, tal como presente na Equação 1. A Equação 19 foi deduzida com base no campo de visibilidade em curvas horizontais e depende da flecha entre arco da trajetória e corda correspondente, na abordagem

em geometria; que resulta em equação de segundo grau, cuja raiz considerada é a positiva.

$$v_{Ei} = \sqrt{R_{ci} \times g \times (e_i + f_{ti})} \quad (18)$$

Em que:

v_{Ei} : velocidade máxima de estabilidade na curva da parte final do segmento i (m/s)

R_{ci} : raio circular do segmento i (m)

g : aceleração da gravidade (m/s^2)

e_i : superelevação da curva i

f_{ti} : coeficiente de atrito transversal da curva horizontal do segmento i

válida para qualquer sistema coerente de unidades

$$v_{Vi} = 128,2 \times \left(-0,69 + \sqrt{0,69^2 + \frac{0,0312}{f+i} \times (R_c - M_{\min})} \right) \times (f+i) \quad (19)$$

Em que:

V_{Vi} : velocidade de segurança de visibilidade na curva i (km/h)

f : coeficiente de atrito longitudinal (adimensional)

i : declividade longitudinal da tangente anterior à curva (m/m)

R_c : raio de curvatura circular horizontal (m)

M_{\min} : flecha mínima de visibilidade em curva (m)

A extensão de cada trajetória de risco (L_R) é calculada com a soma da extensão total de tangentes e desenvolvimentos de curvas horizontais até ao PC da curva onde a $V_F > V_R$, apresentado na Equação 20.

$$L_{Ri} = \sum_{j=1}^N (L_j + D_j) \quad (20)$$

Em que:

L_{Ri} : extensão da trajetória de risco i (m)

L_j : extensão da tangente j (m)

D_i : desenvolvimento da curva horizontal j (m)

Os valores de IRV_L e IRV_c são calculados segundo as equações 12 e 13, respectivamente, para cada segmento tangente-curva do trecho estudado. A Tabela 8 apresenta o trecho inicial de uma planilha para cálculo dos valores de IRV, para os 5 primeiros segmentos.

As grandezas estão apresentadas em relação a cada quilômetro nas correlações, em face das informações de acidentes serem referenciadas com precisão a esta unidade. Dados dos segmentos, tais como IRVs e raios, são apresentados segundo suas médias e comparados “dentro de cada quilômetro da

rodovia”. Em seguida, lançam-se os quantitativos de acidentes em termos de tipos de sinistros e veículos, nas mesmas linhas de cada quilômetro.

Com os valores de IRVs e quantidades de cada tipo de acidente ou tipo de veículo, faz-se a análise de dados globais, visando determinar as melhores correlações entre tipos de acidentes e veículos, associados aos valores de IRV ou outras grandezas físicas do trecho rodoviário. Em seguida, elaboram-se gráficos das melhores correlações, apresentando a equação e o coeficiente de correlação.

Tabela 8 – Trecho de Planilha de Estimativas de IRVs Segundo o Modelo Arco-Íris

															excesso de velocidade:		176 %			
															acima da velocidade permitida					
															velocidade de risco global (V _G):		110 km/h			
															Coef. De atrito longitudinal: f=		0,40			
AC, L, R: determinados com transferidor e escaimetro															km do PC:				km do PC:	
com precisão de grau inteiro e metro inteiro.															calculado pelos		Coef. De atrito transversal: ft=		0,37	
															dados da tabela:		Flecha de campo visível: M=		13,3 (m)	
															L _R (m)		vi (km/h)		acel. vF (km/h)	
															("0" ao PC no "PT" linear		no "PC" (estab.) centr.		(visib.) (m)	
Desenho da															cotas (m):					
rodovia															AC		L		início fim: Lr i R D e	
PCI:															(o)		(m)		(m) (%) IRV _L IRV _C até PC:	
															Km calculado:		anterior rampa: da curva		curva: (até out:22)	
															(m)		(m/s2) (km/h)		(m/s2) (km/h) /R>VF	
															1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27					
															0		10 100		93 .+ 200	
															1		18 170 964 957 130 -5,4 365 115 7,0		5 8 170 93 .+ 370 170 40 0,53 63 143 4,32 105 105 não 89 .+ 770	
															2		36 15 952 950 48 -4,2 235 148 8,0		12 41 300 93 .+ 500 300 105 0,41 110 116 4,41 93 93 SIM 89 .+ 900	
															3		53 260 943 933 190 -5,3 84 78 5,0		31 114 707 93 .+ 907 260 93 0,52 110 67 4,12 67 67 SIM 90 .+ 307	
															4		38 86 923 919 86 -4,7 212 141 6,0		4 20 871 94 .+ 71 86 67 0,46 74 108 4,22 90 90 não 90 .+ 471	
															5		12 158 912 904 150 -5,3 410 86 6,0		9 20 1170 94 .+ 370 385 74 0,52 103 150 4,22 109 109 não 90 .+ 770	

Colunas:

1	Ângulo Central (graus)	10	IRV _{Lv}	19	VF (velocidade final)
2	Extensão da Tangente (m)	11	IRV _{Cv}	20	VE (vel. Limite de estab. Curva)
3	Cota inicial da tangente (m)	12	Extensão acumulada desde origem	21	Acel. Centrípeta na curva
4	Cota final da tangente (m)	13	Posição atual do segmento (km)	22	VV (vel. Limite de visibilidade)
5	Extensão de ref. para Tang. (m)	14	"quilometragem com metragem"	23	VR (mínimo entre VE e VV)
6	Declividade da tangente (%)	15	Extensão complementar no km (m)	24	Condição: VR>VF?
7	Raio de Curvatura Horiz. (m)	16	LRi (de cada trajetória de risco)	25	Pos. anterior do segmento (km)
8	Desenvolvimento da curva (m)	17	VI (velocidade inicial)	26	"quilometragem/metroagem"
9	Superelevação (%)	18	Aceleração na tangente	27	Ext. complementar no km (m)

Fonte: Do Autor (2023)

As células da Tabela 8 onde se anotam o excesso de velocidade, a velocidade de risco global, os coeficientes de atrito e a flecha de campo visível são variáveis ao longo do processo de maximização do R². Durante este processo, elaboram-se gráficos de correlação entre IRVs e acidentes, tal como se exemplifica na

Tabela 9. Varia-se os valores de uma grandeza de otimização enquanto se mantém constantes as outras. Sugere-se repetir o processo para a devida maximização do valor de R².

A velocidade de risco global (V_G) que se estabelece após se determinar o grupo de dados que ofereça o maior R² pode ser subentendida como a velocidade média na iminência da ocorrência de sinistros, estimada para cada tipo de acidente ou veículo. Os valores finais do grupo de grandezas variáveis auxiliam na concepção do cenário de pico de cada acidente, correspondente aos valores finais de flecha do campo de visibilidade, excesso de velocidade em relação à adotada como limite, coeficientes de atrito longitudinal e transversal.

Tabela 9 – Trecho de Planilha de IRVs e Acidentes por Quilômetro pelo Modelo Arco-Íris

Estudo por quilometragem:							ACIDENTES COM VÍTIMA NA BR 116 GUAPIMIRIM - DE 2009 A 2018																						
km	Acm	L m	i m	R m	D m	e m	IRV _L	IRV _C	km	FT	VNL	VN	VN	TV	IN	AP	QE	TB	CP	CL	CR	CE	CT	CF	SP	DC	DA	IRV _L	IRV _C
(20°)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)																								
89	27	89	-5	300	131	0	9	19	89	0	10	2	12	7	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	9	19
90	34	128	-5	223	102	0	18	38	90	1	35	7	42	50	0	0	2	2	0	3	3	0	5	9	3	0	0	18	38
91	46	162	-6	143	71	0	21	57	91	3	34	2	36	48	0	0	4	5	2	7	1	1	3	2	1	0	0	21	57
92	87	273	-7	81	120	0	42	87	92	1	17	9	26	21	0	0	1	3	1	1	2	0	1	2	2	0	0	42	87
93	60	95	-7	64	59	0	15	54	93	1	15	1	16	22	0	0	1	2	0	1	0	2	2	3	2	0	0	15	54
94	75	147	-6	65	62	0	18	78	94	2	24	12	36	31	0	2	4	2	2	2	1	1	1	4	2	0	0	18	78
95	89	147	-7	79	109	0	21	65	95	7	46	20	66	77	0	0	8	3	0	8	4	2	1	12	2	0	0	21	65
96	56	91	-5	109	91	0	15	50	96	0	51	8	59	21	0	0	3	2	1	1	0	2	0	5	0	0	1	15	50
97	66	139	-6	111	119	0	13	53	97	1	14	9	23	31	0	1	0	3	0	2	0	0	5	4	0	0	0	13	53
98	68	108	-6	100	116	0	13	53	98	0	49	6	55	45	0	0	4	4	2	4	1	0	6	4	1	0	0	13	53
99	87	161	-7	80	113	0	29	70	99	0	54	5	59	46	0	1	7	7	2	2	3	1	2	3	5	0	0	29	70
100	64	115	-5	96	106	0	13	50	100	0	23	4	27	20	0	0	0	0	1	2	1	2	0	3	4	0	1	13	50
101	44	240	-5	90	73	0	30	73	101	2	31	6	37	36	0	3	3	1	2	1	5	1	0	4	3	0	0	30	73
102	107	176	-6	110	204	0	16	54	102	16	43	23	66	55	0	1	9	2	0	6	1	2	1	5	6	0	0	16	54
103	66	110	-5	106	123	0	11	48	103	1	27	12	39	40	0	2	5	3	0	3	5	1	1	2	3	0	0	11	48

KC: km crescente; KD: km decrescente; VNL: vítimas não fatais leves; VNG: vit. Não fatais graves
 SV: sem vítima; CV: com vítima; VL: vítima leve; VG: vítima grave; VN: total de vítimas não fatais; FT: vit. Fatais
 veículos: 1 Automóvel; 2. Caminhonete; 3. Caminhão; 4. Ônibus/microônibus
 veículos: 5 Motocicleta; 6. Bicicleta; 7. Outros TV: total de veículos
 tipo de sinistro: CT: colisão traseira; CF: Colisão Frontal; CL: colisão lateral; CR: Colisão transversal
 tipo de sinistro: CH: choque; AP: atropelamento/pedestre; AA: atropelamento/animal; QE: queda
 tipo de sinistro: TB: tombamento; CP: Capotamento; EG: engavetamento; CE: col. Obj estático OU: outros
 tipo de sinistro: SP: saída de pista; DC: derramamento de carga; DA: danos; IN: incêndio

Fonte: Do Autor (2023)

A sequência executiva do Modelo Arco-Íris está detalhada, conceitualmente, no Quadro 6. Todos os Modelos citados na metodologia foram desenvolvidos para

esta pesquisa e foram aprimorados visando melhoria de correlações com bancos de dados de acidentes rodoviários.

Quadro 6 – Sequência Executiva do Modelo Arco-Íris

Item	Definição	Ações (“Passo a Passo”):
1	Seleção de trecho e Dados	Escolha de trecho rodoviário para pesquisa, com disponibilidade de <i>as built</i> ou obtenção dos dados geométricos por projeto verificado quanto a alterações ou ainda pelos dados abertos da web. Obtenção de dados de acidentes rodoviários completos (tipo, local, data, ocupantes, nível de severidade) por período mínimo de 10 anos.
2	Obtenção dos Elementos de acidentes	Dados de acidentes: do Datatran: converter os arquivos com extensão “.csv” (de grande porte) para arquivos excel ou similar; isolando a “BR” em estudo, com o comando classificar. Copiar os dados para outra planilha, onde deverão ser classificados por “km”, isolando-os por tipos e quantidades, tal como apresentados no Anexo A e na Tabela 9.
3	Obtenção dos Elementos geométricos e estimativas de índice de risco (IRVs); em modelagem curva a curva	Montagem de planilha de dados com linhas relativas aos PCs de cada curva. As colunas devem apresentar os elementos geométricos em estudo, tal como apresentado na Tabela 8. Em colunas seguintes, calcular os índices de risco, “km+m” de cada PC das curvas do trecho, extensão acumulada ao longo do trecho (indicará a extensão total do trecho ao final), coluna da extensão de aceleração (Li) que acumula extensão de tangentes e desenvolvimentos de curva enquanto a a velocidade final (VF) não for maior que a velocidade VRmin (que corresponde à menor dentre as velocidades de estabilidade, VR1; e de visibilidade, VR2. A velocidade inicial (Vi) ocorre no PT anterior (onde começa nova tangente). A aceleração linear é função da parcela de peso devida à declividade (i) da tangente, para estimar a VF.
4	Obtenção dos Elementos geométricos e IRVs médios; km por km	Em função do desconhecimento da curva correspondente a cada acidente pelo fato de que são anotados com precisão de km, discretizam-se os valores quilômetro por quilômetro, em termos médios das grandezas estudadas, tal como se apresenta na Tabela 9.
5	Elaboração dos Gráficos Finais e Regressões	Com a opção “Análise de Dados” em Ferramentas, das planilhas excel, pode-se determinar os coeficientes de correlação de Pearson entre as séries de sinistros com os IRVs e outras grandezas, para conhecimento das que apresentem maiores valores de R. Elaboram-se gráficos (opção Gráfico, em “inserir” da planilha excel, em tipo “dispersão”, adicionando a “linha de tendência” e, em opções, “exibir equação” e “exibir R2”.
6	Análise Qualitativa	A significância do modelo está associada aos coeficientes de determinação. Valores de R2 entre 0,6 e 0,7 são considerados bons a satisfatórios. Valores de R2 entre 0,7 e 0,8 são considerados muito bons a ótimos. Valores superiores a 0,8 são considerados ótimos a excelentes.
7	Aplicações dos Gráficos	Permite auxiliar na busca de locais de maior concentração de acidentes visando intervenções físicas para reduzir a mitigar a severidade e totais: indica-se considerar os valores mais altos de IRVs como ferramenta. As planilhas podem ser testadas com distintos valores dos elementos visando a redução dos IRVs em cada km em estudo. Não há necessidade de se trabalhar com índices pelo fato de que o estudo todo está compartimentado em uma extensão, período de tempo e, possivelmente, mesma demanda veicular.
8	Aplicação do Modelo	Permite conceber equações universais para determinados tipos e severidades de acidentes, viabilizando o desenvolvimento de projetos de novas rodovias ou de melhoramentos, com base em valores limites adotados de IRVs.

Fonte: Do autor (2024)

4 RESULTADOS

Os principais resultados estão apresentados em gráficos, na forma de regressões entre as séries numéricas de distintos tipos de acidentes e os valores de IRVs estimados com as grandezas físicas da geometria rodoviária de cada trecho correspondente. Incluem a equação correlacional, o modelo de regressão e o coeficiente de determinação.

O coeficiente de determinação igual a 0,6 foi considerado como mínimo no processo de seleção das melhores regressões entre as séries estudadas.

4.1 Excesso de Velocidade em Rodovias Sinuosas

Os levantamentos de velocidades foram efetivados entre 2016 e 2019. Na Tabela 10, apresenta-se um resumo das contagens consideradas para mensurações ao longo de trechos. O detalhamento desta pesquisa está no [Apêndice H](#).

Como o IRV associa o quadrado da velocidade com grandezas físicas de cada curva estudada, tem-se na velocidade veicular, associada aos sinistros, informação normalmente desconhecida, pelo fato de que apenas veículos comerciais podem estar equipados com tacógrafos e estes, nem sempre, têm a informação disponível e confiável. A velocidade é grandeza fundamental nas análises segundo o Modelo Arco-Íris, onde o excesso em relação à permitida é grandeza variável no processo de busca das melhores regressões.

Como este trabalho associa o risco operacional a determinadas grandezas físicas da via, cujos modelos estão concebidos em cenário de possível perda de estabilidade em curvas horizontais, o quadrado da velocidade está adequadamente associado à aceleração centrípeta, uma grandeza abordada indiretamente nas expressões matemáticas.

Para obter informações objetivas sobre a relevância dessa abordagem para os modelos estudados, foram levantadas velocidades veiculares e seus excessos, em determinados pontos e trechos rodoviários do sudeste brasileiro, sítio selecionado para as avaliações rodoviárias quanto ao padrão de condução veicular.

Tabela 10 – Contagem de Ultrapassagens Sob Excesso de Velocidade

Rodovia :	Município:	Local (km):	Dia e Horário:	Sentido:	V (km/h)	U1	U2	G1	G2	P	Σ
BR 101 Rod. Gov Mario Covas	Mangaratiba RJ Pista única	445 ao 498	25/7/2017 Início: 8:35h Término: 9:40h	Rio de Janeiro a Santos	40 50 60 80	23 46% 3 27% 7 70% 1 50%	0 0 1 0 0 10%	27 8 1 0 0 50%	0 0 0 0 0 50%	0 0 1 1 0 50%	50 11 10 2
SP 125 Rod. Oswaldo Cruz	São Luiz do Paraitinga SP Pista única	31 ao 25	26/7/2017 Início: 8:17h Término: 8:30h	Ubatuba a Taubaté	40 60 80	3 100% 7 100% 3 100%	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	3 7 3
BR 116 Via Dutra	Caçapava SP Pista dupla	128 ao 145	26/7/2017 Início: 9:03h Término: 9:14h	Taubaté a São José dos Campos	110	0	0	0	0	3 100%	3
SP 65 Via D. Pedro I	Igaratá, Nazaré Paulista e Atibaia SP Pista dupla	7 ao 73	26/7/2017 Início: 9:46h Término: 10:25h	Jacareí a Campinas	110 100	4 6% 3 50%	0 0 0	0 0 0	0 0 0	59 94% 3 50%	63 6
BR 101 Rod. Gov Mario Covas	Bertioga SP Pista única	213 ao 243	4/8/2017 Início: 6:50h Término: 7:32h	Bertioga Cubatão	40 60 80	13 76% 2 33% 1 100%	4 24% 0 50% 0 17%	0 3 1 0 0	0 1 0 0 0	0 0 0 0 0	17 6 1
SP 160 Rod. Dos Imigrantes	Cubatão SP Autoestrada	(início da serra)	4/8/2017 Início: Término: (horário não anotado)	Cubatão	80 100	3 37% 4 9%	4 50% 4 9%	0 0 0	0 0 0	1 13% 38 82%	8 46

U1: número de automóveis que ultrapassaram o veículo de pesquisa, cruzando linha seccionada branca
U2: número de caminhões e ônibus que ultrapassaram o veículo de pesquisa, cruzando linha seccionada branca
G1: número de automóveis que ultrapassaram o veículo de pesquisa, cruzando linha dupla amarela
G2: número de caminhões e ônibus que ultrapassaram o veículo de pesquisa, cruzando linha dupla amarela
V: velocidade permitida no trecho
P: número de veículos que o de pesquisa ultrapassou

Do autor (2022)

quanto ao alto risco operacional e à severidade do CTB, que acarretaria, para este excesso, multa e suspensão do direito de dirigir.

A velocidade permitida, estabelecida em projeto de rodovia antiga, poderia ser majorada, caso fosse estabelecida exclusivamente em função da evolução tecnológica veicular. Contudo, os tempos de percepção e de reação dos motoristas não se alteram bem como deve-se levar em conta a parcela de veículos antigos, com idade superior a 10 anos, que compõem aproximadamente metade da frota nacional.

4.2 Regressões Considerando o Modelo Cabo de Guarda-Chuva

O Modelo Cabo de Guarda-Chuva foi aplicado a trechos de rodovias de pista única, com traçado sinuoso. O primeiro trecho selecionado foi da Rodovia SP 98 Paulo Rolim Loureiro, com extensão total de 26 km, compreendendo parte em planalto e a descida da Serra do Mar.

As análises estatísticas das séries obtidas apresentaram coeficientes de correlação (R) com valores inferiores a **0,3**. A Tabela 12 apresenta os elementos e IRVs das dez primeiras curvas horizontais do trecho selecionado da SP 98. A Tabela completa dos trechos e outras informações mais detalhadas sobre a aplicação do modelo na SP 98 estão presentes no [Apêndice J](#).

Tabela 12 – Valores de IRV das Dez Curvas Iniciais do Trecho Selecionado da SP 98

PCi:	AC (o)	L (m)	i (%)	R (m)	D (m)	e (%)	Lac até PC:	Km calculado do PC: km	v (km/h)	IRV _{LG}	IRV _{CG}	IRV _L	IRV _C		
0								67	+	380,000	k=	100	100	0,1	100
1	66	100	1,2	115	132,5	6,9	100,0	67	+	480,000	60	80	-7	22	18
2	99	130	-3,5	76	131,3	7,4	362,5	67	+	742,470	60	164	-7	46	30
3	31	78	-2,7	89	48,2	7,1	571,8	67	+	951,789	60	84	-7	23	25
4	55	150	-3,8	116	111,4	7,9	769,9	68	+	149,943	60	124	-8	34	16
5	14	132	-1,6	246	60,1	2,5	1.013,3	68	+	393,295	60	53	-2	15	9
6	31	320	3,1	83	44,9	6,9	1.393,4	68	+	773,404	40	348	-7	43	8
7	72	93	-3,5	72	90,5	8,6	1.531,3	68	+	911,311	60	122	-8	34	31
8	47	21	-4,0	158	129,6	3,2	1.642,8	69	+	22,789	60	13	-3	4	15
9	21	171	-5,3	238	87,2	5,4	1.943,4	69	+	323,397	60	72	-5	20	6
10	8	165	2,8	255	35,6	3,6	2.195,6	69	+	575,629	60	61	-4	17	7

Do Autor (2023)

Os valores de IRV_{CG} da Tabela 12 apresentam-se negativos, indicando que o índice não é adequado segundo o escopo do trabalho, que é o de estimativas de IRVs cujos valores cresçam à medida que um dado tipo de acidente ou índice de acidentes aumente. Este tipo de IRV foi eliminado das fases posteriores de análises do trabalho, fato que provavelmente se deve pela ausência do parâmetro velocidade.

A anotação da posição dos acidentes é predominantemente oferecida com base no marco quilométrico. Os valores de IRV foram calculados por quilômetro e em termos médios, associando-os à quantidade e a índices de acidentes, tal como inseridos na Tabela 13, visando elevar os coeficientes.

Tabela 13 – IRVs Médios por km e Correspondentes Sinistros – Trecho Serrano da SP 98

km	AC médio: (°)	L médio: (m)	i médio: (%)	P final do (m)	D final do (m)	e médio: (%)	IRV_{LG} méd	IRV_{CG} méd	IRV_L méd	IRV_C méd	VN	FT	1	2	3	4	5	6	7	TV	CL	CR	TB	CP	
81	34	624	-7	305	224	6	172	-6	45	0	67	5	29	3	10	2	10	0	1	32	2	1	6	4	
82	42	72	-8	277	48	8	78	-7	22	22	179	32	55	5	54	0	54	3	0	60	11	5	39	2	
83	39	88	-8	140	37	7	67	-7	16	12	167	32	40	3	30	2	36	2	0	43	6	2	29	10	
84	53	49	-5	151	74	7	57	-6	12	19	342	23	137	16	43	2	58	2	1	153	13	12	46	11	
85	36	99	-7	137	81	7	67	-7	19	13	93	5	51	5	5	1	16	3	0	56	6	2	11	3	
86	41	54	-7	161	56	7	51	-6	14	21	168	6	81	7	10	5	40	2	0	88	8	11	28	5	
87	37	83	-5	74	77	7	77	-7	20	19	73	3	36	6	7	2	22	0	0	42	4	2	14	4	
88	37	64	-5	375	79	7	44	-7	8	5	257	7	138	22	3	2	55	4	1	160	13	13	39	9	
89	36	114	-5	220	184	4	44	-4	12	10	80	3	31	6	5	2	10	0	0	37	0	3	7	3	
90	67	160	-7	185	174	7	137	-6	38	19	113	4	44	5	4	0	38	3	0	49	3	3	32	6	
91	59	70	-4	187	7	7	61	-7	17	22	171	12	75	6	5	2	48	1	0	81	10	9	33	2	
92	15	130	-8	193	81	7	48	-7	21	9	23	0	8	0	0	0	9	0	0	8	0	0	7	1	
											Σ :	1733	132	725	84	176	20	396	20	3	809	76	63	291	60

Veículos: 1 Automóvel; 2. Caminhonete; 3. Caminhão/trator; 4. Ônibus/microônibus; 5 Motocicleta; 6. Bicicleta; 7. Outros; TV: total de veículos. VN: vítima não fatal; FT: fatal
Tipo de sinistro: CT: colisão traseira; CF: Col. Frontal; CL: col. lateral; CR: Col. Transversal; CH: choque; AP: atropelamento/pedestre; AA: atropelamento/animal; TB: tombamento; CP: Capotamento; EG: engavetamento; OU: outros. Acidentes com vítima na SP 98, de **2009 a 2018** (revisão: 2023)

Do autor (2023)

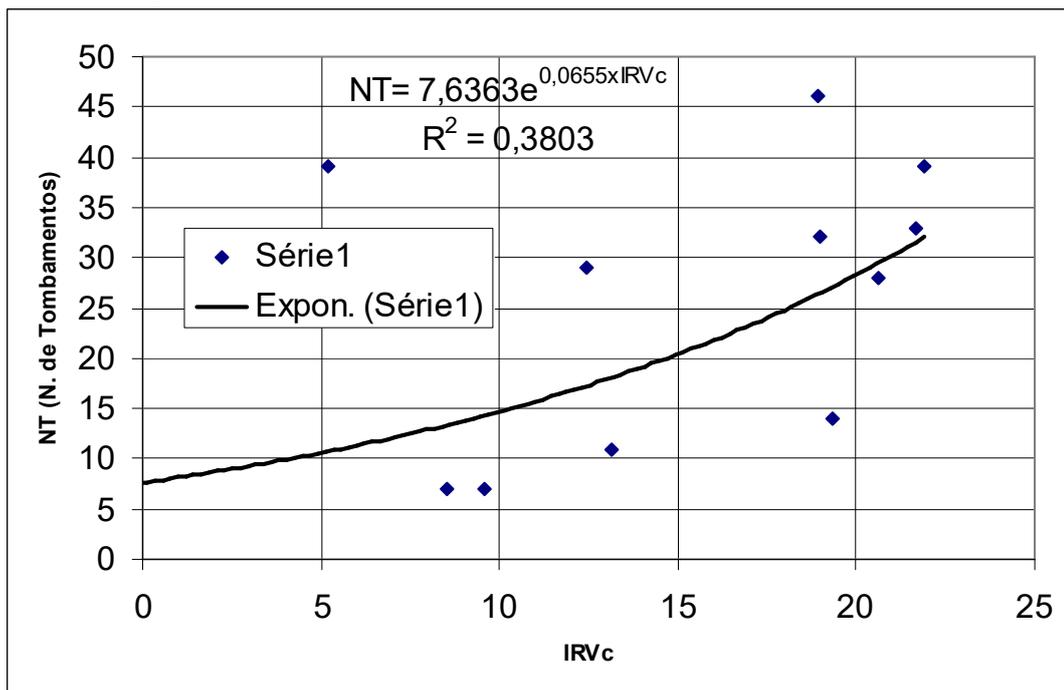
A partir das análises com valores de IRVs por quilômetros, obteve-se $R=0,52$, o máximo coeficiente de correlação entre as séries de IRV_C e tombamentos. Nas análises com IRV_{LG} associados a capotamentos, obteve-se máximo R igual a 0,24 e entre valores de IRV_L com tombamentos, $R=0,29$ e com capotamentos, $R=0,25$. No [Apêndice J](#), tem-se a série completa dos coeficientes de correlação.

As melhores regressões para aplicação do Modelo Cabo de Guarda-Chuva ocorreram para valores de IRV_C , na aplicação no trecho de Serra da SP 98 e acidentes entre 2009 e 2018.

A partir das regressões com os maiores valores de R, foram testadas outras bases de regressão matemática, visando majorar coeficientes de determinação.

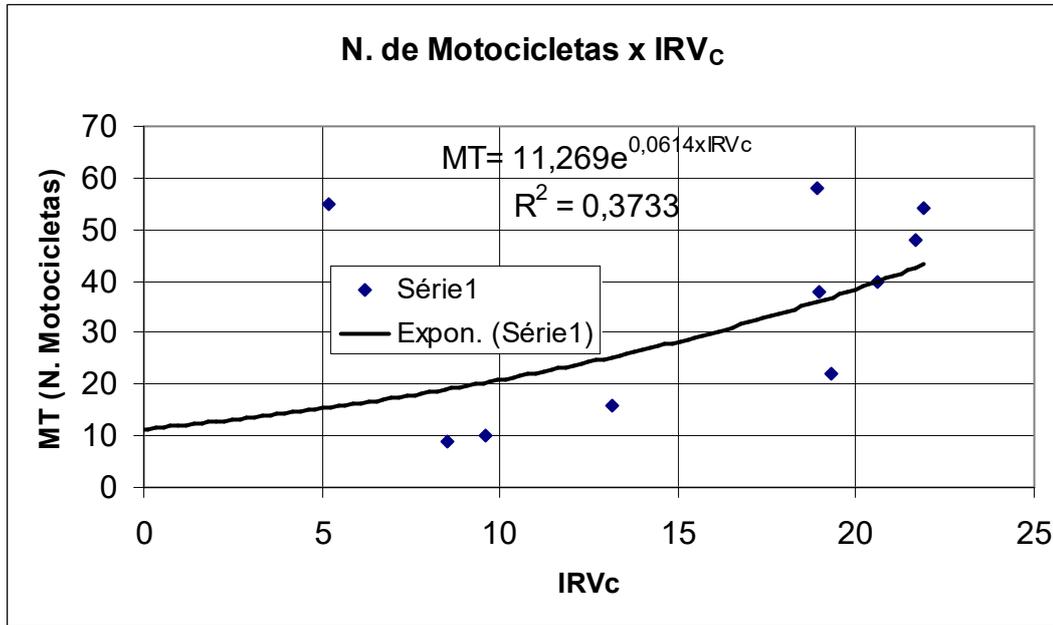
Na Figura 34, apresenta-se o gráfico entre IRVc e o número de tombamentos em acidentes com vítima, com série em potência. Na Figura 35, tem-se gráfico associando número de motocicletas em acidentes com vítima, com regressão em potência, e na Figura 36, número de automóveis em acidentes com vítima e o IRVL, em regressão polinomial. Nesta última, o $R^2 = 0,54$ é o maior observado na aplicação do Modelo e ainda gera um ponto de mínima da função, mostrando que valores de IRVc inferiores a 32 indicam diminuição do número de vítimas com o aumento do índice de risco. Este teste numérico do modelo indica necessidade de análise de outros conjuntos amostrais ou maior volume de dados ou ainda a busca de aprimoramento ao Modelo.

Figura 34 – Regressão em Potência – Tombamentos e IRVc – Mod. Cabo de Guarda-Chuva



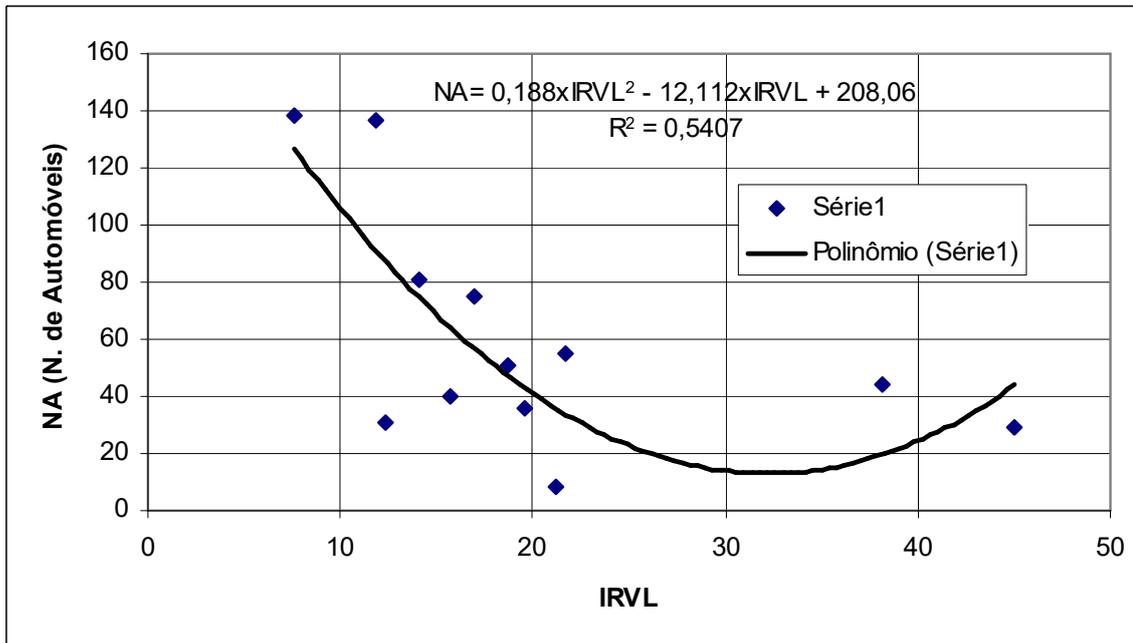
Do Autor (2023)

Figura 35 – Regr. Pol. – N. de Motocicletas (c/vítimas) e IRV_C – Mod. Cabo de Guarda-Chuva



Do Autor (2023)

Figura 36 – Regressão Linear – Vit. Fatais em Automóveis e IRV_L – Modelo Cabo de Guarda-Chuva



Do Autor (2023)

4.3 Considerações ao Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado

O Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado foi testado no banco de dados do trecho serrano da SP 98 e seus resultados estão na Tabela 14, gerada em ambiente de planilha eletrônica.

Tabela 14 – IRVs Estimados sob Critério $N_{LIM}=D/R^2$; no Trecho Serrano da SP 98

km	AC médio: (°)	L médio: (m)	i médio: (%)	R final do km: (m)	D final do km: (m)	e médio: (%)	D/R^2 10000	LEQ 40	IRVL 100	VÑ	FT	ônibus micro.	TB	CP
81	34	624	-7	305	224	6	24,03	624	205	67	5	2	6	4
82	42	72	-8	277	48	8	6,30	744	267	179	32	0	39	2
83	39	88	-8	140	37	7	18,70	869	627	167	32	2	29	10
84	53	49	-5	151	74	7	32,36	991	645	342	23	2	46	11
85	36	99	-7	137	81	7	43,31	99	72	93	5	1	11	3
86	41	54	-7	161	56	7	21,68	210	130	168	6	5	28	5
87	37	83	-5	74	77	7	141,51	83	110	73	3	2	14	4
88	37	64	-5	375	79	7	5,59	225	59	257	7	2	39	9
89	36	114	-5	220	184	4	38,08	524	240	80	3	2	7	3
90	67	160	-7	185	174	7	50,94	160	86	113	4	0	32	6
91	59	70	-4	187	7	7	1,87	236	122	171	12	2	33	2
92	15	130	-8	193	81	7	21,70	447	231	23	0	0	7	1

LEQ: extensão de aceleração (tangentes e curvas de grande raio); VN: número de vítimas não fatais; FT: número de vítimas fatais; OM: ônibus e micro-ônibus; TB: tombamentos; CP: capotamentos
Fonte: Do Autor (2023)

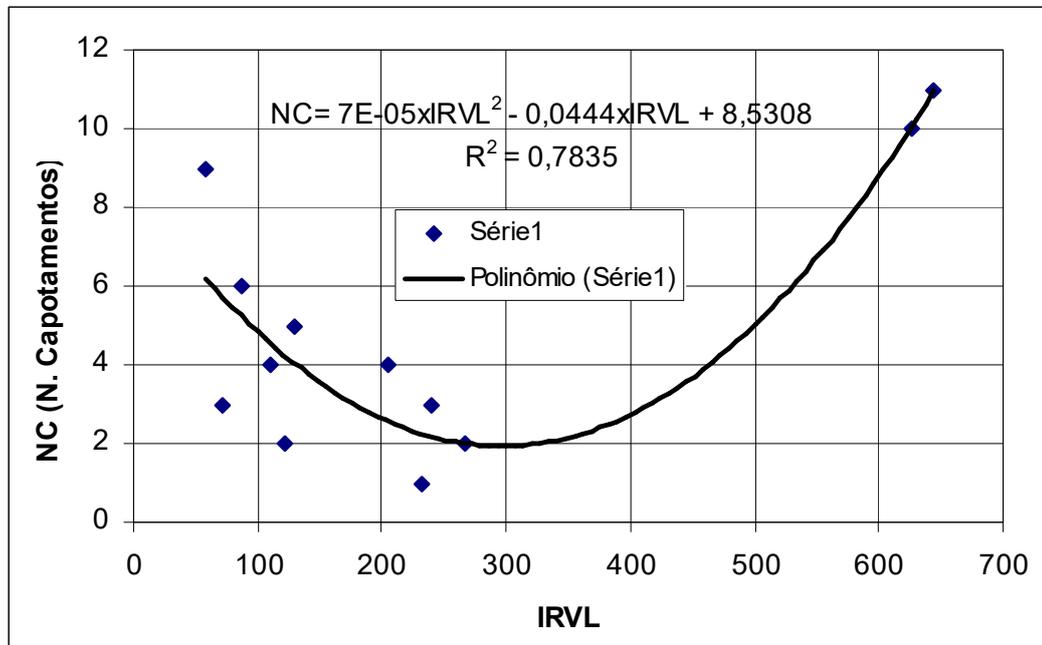
Seguiu-se procedimento de busca de melhores correlações, alterando-se os valores de LEQ (comprimento equivalente de possível aceleração) presentes na célula logo abaixo da célula onde se lê a sigla correspondente. Os valores de LEQ estão sujeitos aos de D/R^2 , cujos coeficientes de correlação tornam-se distintos para cada tipo de banco de sinistros.

Nesta tabela, o valor de LEQ igual a 40 gerou o máximo R^2 do gráfico presente na Figura 37. Um critério complementar foi imposto: como o estudo é desenvolvido por valores determinados por quilômetro, os valores de D/R^2 foram calculados com os desenvolvimentos e raios das curvas finais de cada unidade de estudo.

O gráfico da Figura 37, da correlação entre $IRVL$ e Capotamentos, segundo o Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado, apresentou a melhor correlação para $N_{LIM} = 40$ e $R^2 = 0,78$; em regressão polinomial. Esta correlação indica que os valores crescentes de $IRVL$, até 300, geram risco decrescente, indicando relação adequada apenas para valores superiores. Portanto, esta abordagem ainda exige

aprimoramento. Há outras correlações do Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado no [Apêndice K](#).

Figura 37 – IRV_L e Capotamentos – Cabo de Guarda-Chuva Mod. p/N_{LIM}=40 - Serra da SP 98



Do autor (2023)

O Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado contribuiu na melhoria da abordagem original quanto à possível aceleração em curvas de raios elevados, mas não oferece critérios para restringir extensão excessiva de aceleração antes das ocorrências de curvas de raios menores.

4.4 Regressões Segundo o Modelo Arco-Íris (Teste do Modelo)

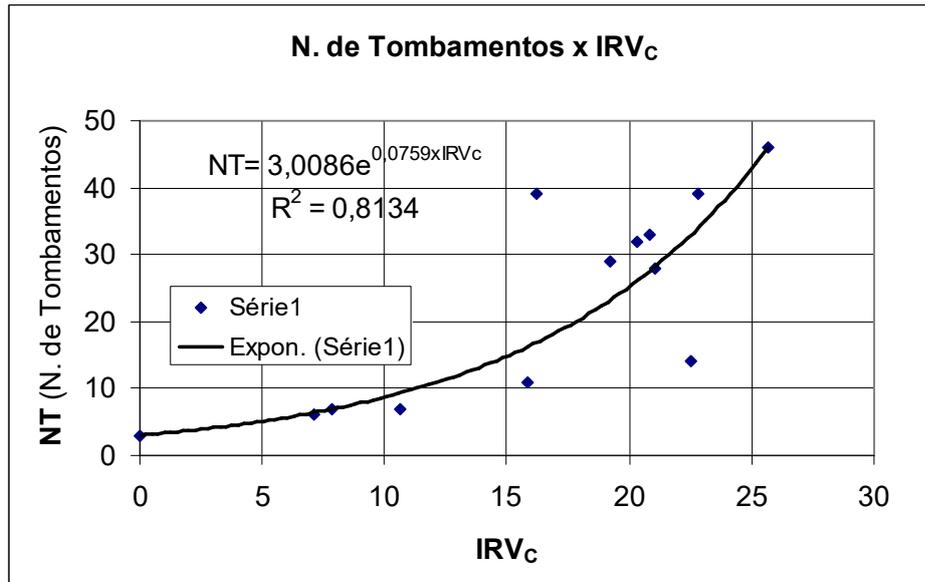
O Modelo Arco Íris corresponde à evolução do Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado. Ele visa obter melhores regressões entre os valores de IRVs e os tipos de acidentes, levando em consideração a velocidade e coeficientes equivalentes ao atrito transversal e longitudinal, segundo embasamento matemático.

Uma nova estrutura de planilha de estimativas foi elaborada, da forma como apresentada na Tabela 8, com base nas Equações 17 a 20 e outras informações consideradas nas planilhas utilizadas nos modelos anteriores.

Para teste do modelo, foram lançadas as informações de geometria e acidentes com vítima, ocorridos entre 2009 e 2018, do trecho de Serra da SP 98.

Determinou-se os valores de R^2 , por análise estatística, entre as séries de IRVs e sinistros. A que apresentou maior valor de coeficiente de determinação foi entre IRV_c e Tombamentos Veiculares. A regressão correspondente foi aprimorada em processo iterativo de maximização de resultados de R^2 , tal como apresentado no [Apêndice L](#), resultando no gráfico da Figura 38.

Figura 38 – Regressão entre o Número de Tombamentos e IRV_c (SP 98 – Serra)



Do autor (2023)

Velocidade de referência: permitida, de **40** km/h, excesso de velocidade: **58%**; $f=0,30$; $f_t=0,27$; flecha: $M=12,0$ m, acidentes com vítima, de 2009 a 2018.

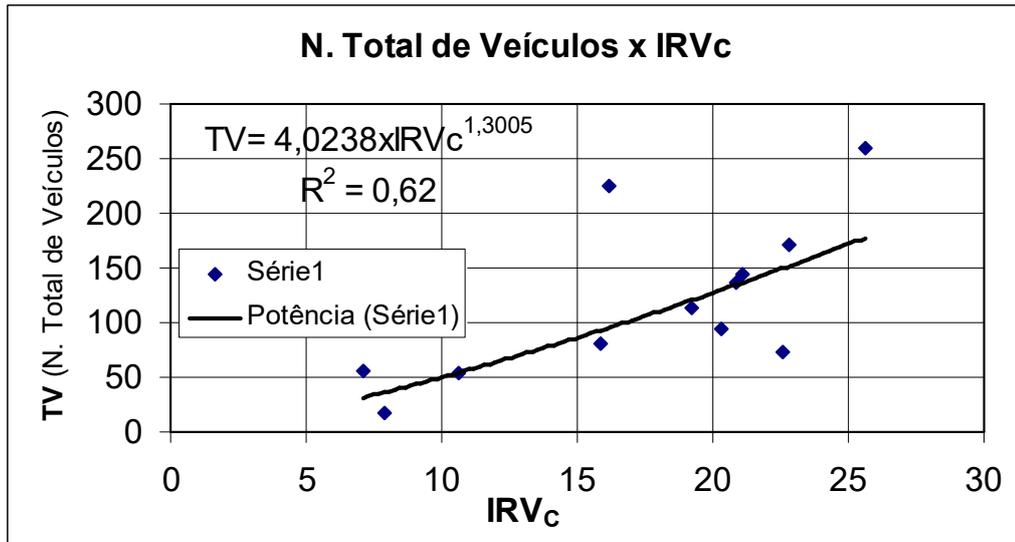
A melhor regressão do Modelo associa série coerente com forças centrípetas em excesso a de tombamentos, para acidentes com vítima, cadastrados entre 2009 e 2018; ocorridos na Serra da SP 98, entre os quilômetros 80 a 92, trecho com predominância em descida. No processo de otimização deste gráfico correlacional, variou-se as grandezas de excesso de velocidade em relação à velocidade permitida, o coeficiente de atrito longitudinal (f), o coeficiente de atrito transversal (f_t) e a flecha do campo de visibilidade (f_v). Obteve-se coeficiente de determinação **$R^2=0,8134$** ; indicando reduzida dispersão de valores de IRV_c em relação ao número de eventos deste tipo de sinistro. Destaca-se que o “Quilômetro 80” não apresenta qualquer curva horizontal, sendo composto apenas por tangente longa, por isto, o $IRV_c=0$, que indica nulidade de risco operacional quanto à aceleração centrípeta em curvas horizontais. Como as análises têm sido executadas por quilômetro, nas unidades onde se apresentem exclusivamente tangentes, este risco é tomado como zero.

O tombamento veicular é um típico acidente de tentativa de estabelecimento de movimento circular sob velocidade excessiva, que, por sua vez, impõe aceleração centrípeta muito alta ao movimento desejado. Segundo o gráfico da Figura 38, a dispersão dos valores, com relação à diferença entre $R^2=0,8134$ e a unidade é devida à influência do comportamento humano, quando às possíveis reações quanto ao iminente acidente. Outros fatores também tendem a influenciar nesta dispersão, como a regularidade superficial e aderência pneu-pavimento, condição meteorológica em termos de precipitação ou visibilidade, relação largura por altura veicular e aspectos tecnológicos em geral, quanto aos veículos envolvidos. Há também a influência da simplificação das análises por unidade de quilômetro.

A Tabela 15 apresenta valores de R entre as diferentes grandezas, índices de bancos de dados de sinistros com vítima, válidos para o trecho de Serra da SP 98 e sinistros entre 2009 e 2018. Os maiores valores de coeficientes, entre as colunas de 1 a 7, das grandezas físicas e IRVs, associadas às colunas de 8 a 22 dos bancos de dados, ocorrem nas correlações de IRV_C , indicando a contribuição do Modelo em relação à qualquer elemento físico estudado de forma isolada ou até em relação à abordagem livre de risco, do IRV_L .

Na Figura 39, apresenta-se a regressão entre pares de valores de número de veículos acidentados com vítimas, considerando todos os tipos veiculares, no período entre 2009 a 2018, na Rodovia SP 98, entre os quilômetros 81 a 92, trecho de Serra. O “Quilômetro 80”, composto apenas por tangente, não foi considerado. Assim, a regressão apresentada correlaciona apenas segmentos com presença de curvas horizontais. No processo de otimização, quando se variavam as grandezas de excesso de velocidade em relação à velocidade permitida, coeficiente de atrito longitudinal (f), coeficiente de atrito transversal (f_t) e flecha do campo de visibilidade (f_v), obteve-se coeficiente de determinação $R^2= 0,62$; menor do que o $R^2=0,8134$; para o estudo de veículos sofrendo tombamento.

Figura 39 – Regressão entre o Número Total de Veículos e IRV_c (SP 98 – Serra)



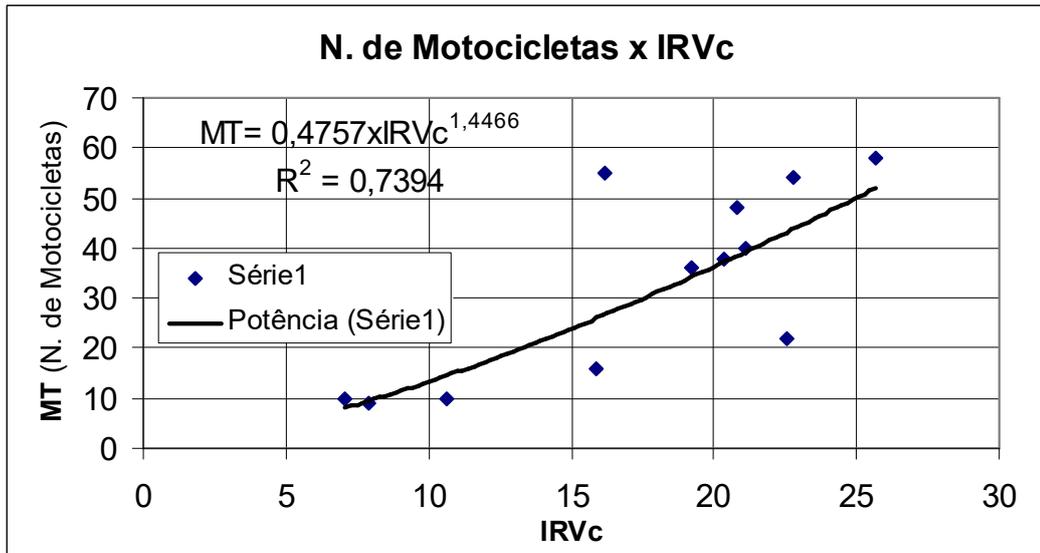
Do autor (2023)

Velocidade de referência: permitida, de 40 km/h, excesso de velocidade: 11%; f=0,22; ft=0,27; flecha: M=11,5 m, acidentes com vítima, de 2009 a 2018.

Na Figura 40, apresenta-se a regressão entre pares de valores de número de motocicletas acidentadas com vítimas, no período entre 2009 a 2018, na Rodovia SP 98, entre os quilômetros 81 a 92, trecho de Serra. O “Quilômetro 80”, composto apenas por tangente, não foi considerado. No processo de otimização, quando se variavam as grandezas: excesso de velocidade em relação à velocidade permitida, coeficiente de atrito longitudinal (f), coeficiente de atrito transversal (ft) e flecha do campo de visibilidade (f_v), obteve-se máximo coeficiente de determinação **R²=0,7394**; valor 9,1% menor que o **R²=0,8134**, da regressão entre tombamentos e IRV_c. O banco de dados correspondente aos tombamentos tem maior correlação em Física aplicada, por se tratar de reação que pode acarretar tombamentos ou capotamentos, em comparação com acidentes de motocicleta, que podem sofrer acidentes em áreas próximas a curvas horizontais não necessariamente sob desequilíbrio por excesso de aceleração centrípeta.

As correlações entre IRV_L e as séries de acidentes com vítima apresentaram-se, sob comparação, com coeficientes de correlação inferiores que os valores para IRV_c e, com valor máximo igual a R²=0,22; na regressão com número de acidentes com caminhões.

Figura 40 – Regressão entre o Número de Motocicletas e IRV_c (SP 98 – Serra)

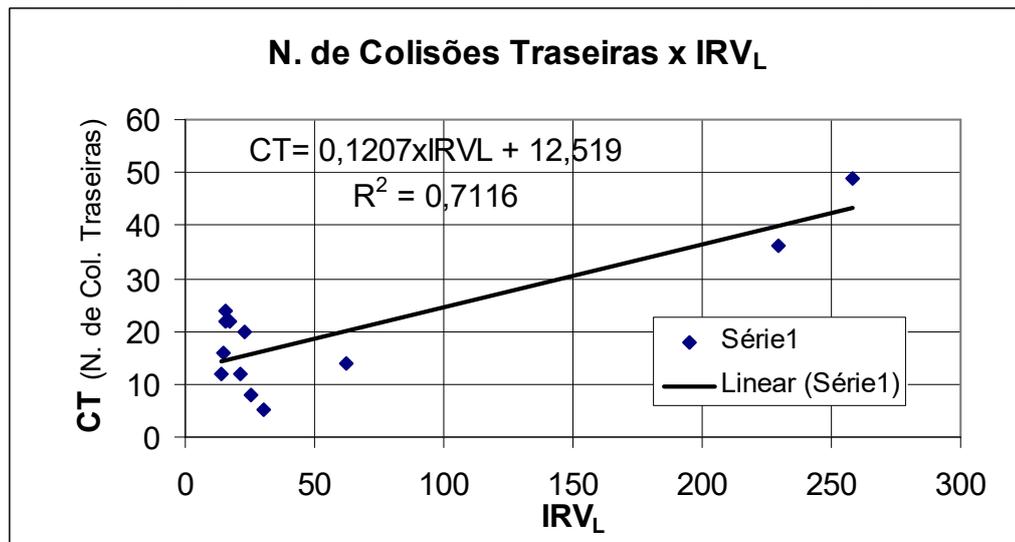


Do autor (2023)

Velocidade de referência: permitida, de **40 km/h**, excesso de velocidade: **34%**; $f=0,21$; $ft=0,23$; flecha: $M=11,0$ m, acidentes com vítima, de 2009 a 2018.

O Modelo Arco Íris também foi testado em séries de acidentes sem vítima. Os maiores valores de R^2 , por análise estatística, entre as séries de IRVs e sinistros sem anotação de injúrias ou morte, apresentaram-se menores do que para acidentes com vítima, para o mesmo trecho e período de levantamento de acidentes. A que apresentou maior valor de coeficiente de determinação entre valores de IRV_L e as séries consideradas; associou o banco de acidentes do tipo Colisões Traseiras. Esta regressão, devidamente otimizada, atingiu $R^2=0,71$, tal como se apresenta na Figura 41. Pode colaborar na compreensão desta série de melhor correlação, mas que não a explica necessariamente sob influência principal de ação centrípeta, o fato de que acidentes sem vítima têm maior espectro de motivos geradores.

Figura 41 – Regressão entre o Número de Colisões Traseiras e IRV_C (SP 98 – Serra)



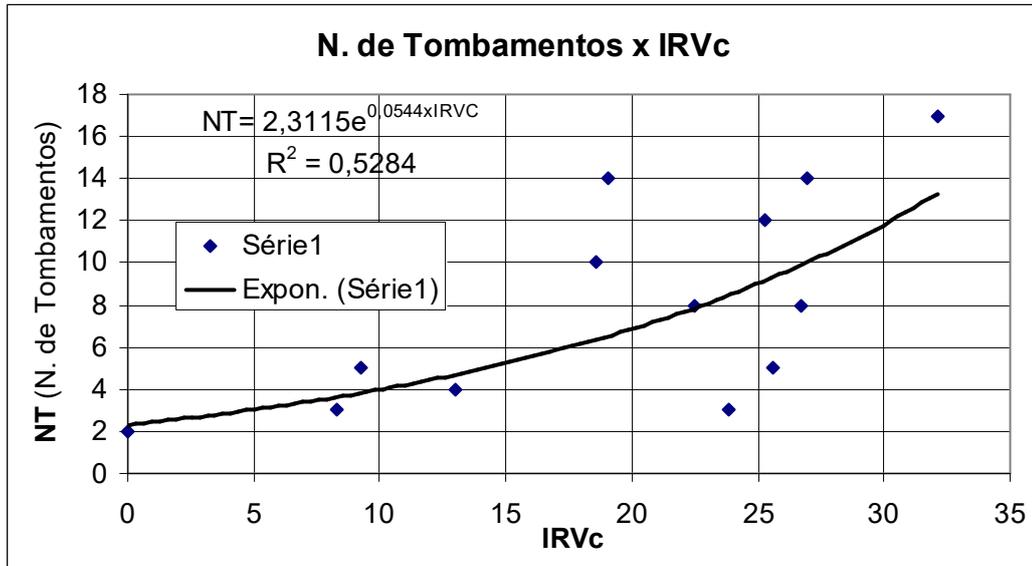
Do autor (2023)

Acidentes Sem vítima, SP 98-Serra; velocidade: 40 km/h+44% = 57,6 km/h; f=0,27; ft=0,29; M=11,4 m

O coeficiente de determinação entre valores de IRV_C e Tombamentos Veiculares, nas análises de bancos de dados de acidentes sem vítima, atingiu máximo de $R^2 = 0,52$, tal como se apresenta na Figura 42, com a inserção dos dados do quilômetro 80, para conhecimento da influência de trecho sem curvas horizontais. Neste tipo de acidente há tendência de geração de pessoas feridas. O acervo das informações de tombamentos sem vítima apresenta total de 105 sinistros contra 294 com vítimas, para o trecho e períodos indicados, correspondendo a 2,8 vezes mais veículos com vítima do que sem vítima, o que pode influenciar em maior dispersão de resultados. Eliminando-se o quilômetro 80 obtém-se $R^2 = 0,36$.

Como o Modelo Arco-Íris apresenta veículos se deslocando sob movimento uniformemente variado, premissa das clássicas abordagens da Cinemática, a velocidade de excesso somada à velocidade de referência ou permitida, corresponde à média das máximas velocidades ao final dos trechos de aceleração, dos veículos que sofreram os sinistros considerados na regressão, quando os veículos passaram a sofrer imposição de redução. Esta velocidade final foi denominada de velocidade de sinistro em curva.

Figura 42 – Regressão entre o Número Tombamentos sem Vítima e IRV_c (SP 98 – Serra)



Do autor (2023)

SP 98 Serra – velocidade: 40 km/h + 45% = 58 km/h; M= 11,5 m; f= 0,27; ft=0,33

4.5 Regressões Segundo o Modelo Arco-Íris (Validação do Modelo)

Estabeleceu-se como critério de validação a aplicação do Modelo Arco-Íris em trecho rodoviário diferente do que se usou para teste e que apresente coeficientes de determinação superiores a 0,6. Para validar o Modelo Arco-Íris, selecionou-se um trecho de outra rodovia, na descida da Serra entre as cidades de Teresópolis e Guapimirim, no Estado do Rio de Janeiro, pertencente à BR 116 Rodovia Rio-Teresópolis. Ambos os trechos rodoviários, tanto de teste quanto de validação, são de elevado VDM, excessivo para as classes em que foram projetadas, pistas únicas, sinuosas e em longas descidas. O considerável volume de acidentes, associados aos altos VDMs e a semelhança de ambientes de pesquisa foi considerado suficiente para as análises dos modelos propostos. Quanto às regressões resultantes, deve-se buscar avançar em novas pesquisas, com maior amplitude de trechos estudados, para o estabelecimento de correlações de uso específico, fato que não pretendido neste trabalho.

O trecho selecionado apresenta plataforma de pista única e mão dupla de operação, com longo trecho sinuoso e em descida, para a devida qualificação da via quanto às premissas do Modelo.

Desta forma, decidiu-se pela continuidade dos trabalhos de busca de validação, considerando os dados abertos, disponíveis na rede mundial de

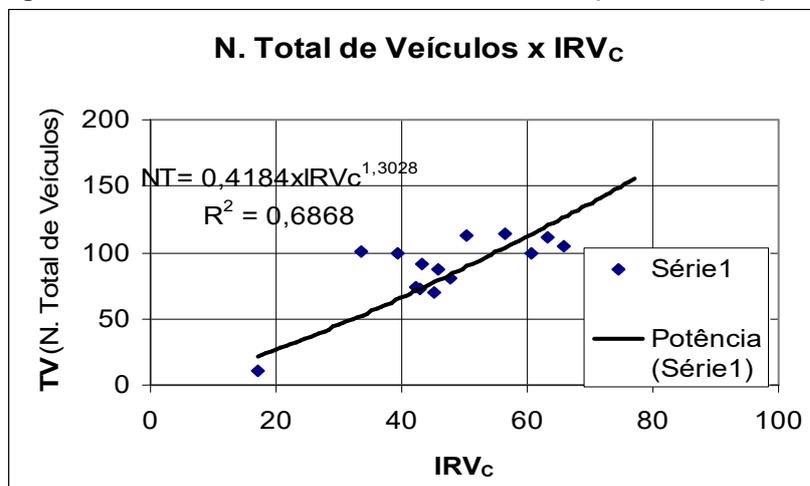
computadores. Os dados de acidentes foram obtidos junto a órgãos públicos federais, para o período entre 2009 e 2018, relativos à BR 116, junto ao Município de Guapimirim, que engloba toda a extensão do trecho selecionado para o estudo.

Considerou-se aceitável a ocorrência de coeficientes de determinação sensivelmente menores ao se utilizar dados abertos para as mensurações dos 4 elementos da geometria da rodovia, em relação aos resultados obtidos a partir de dados de desenhos do trecho.

Os coeficientes de determinação (R^2) atingiram magnitude suficiente para embasar as regressões, considerando-se validado o Modelo, bem como adequadas as melhores regressões entre os bancos de dados de acidentes e IRVs. No [Apêndice M](#), detalha-se os dados utilizados e são oferecidas mais abordagens quanto à validação do Método.

Das regressões entre os valores de IRV e bancos de dados, destacaram-se as melhores correlações para acidentes sem vítima, sob avaliação dos valores de R^2 . Contudo, há resultado de $R^2 = 0,6$; considerando acidentes com vítimas, indicando boa qualidade e gerando reprodução de resultados positivos em sítios distintos. Na Figura 43, apresenta-se gráfico da regressão em base de Potência, sob a otimização de máximo R^2 , quanto às grandezas: velocidade inicial, que foi estabelecida em 40 km/h, excesso de velocidade 138%; coeficiente de atrito longitudinal $f = 0,39$; coeficiente de atrito transversal $f_t=0,38$ e flecha do campo de visibilidade $M = 14,2$ m, gerando $R^2=0,69$. As superelevações foram consideradas neste estudo.

Figura 43 – Regressão entre N. de Veículos sem Vít. e IRV_c (BR 116, Guapimirim/RJ), com e

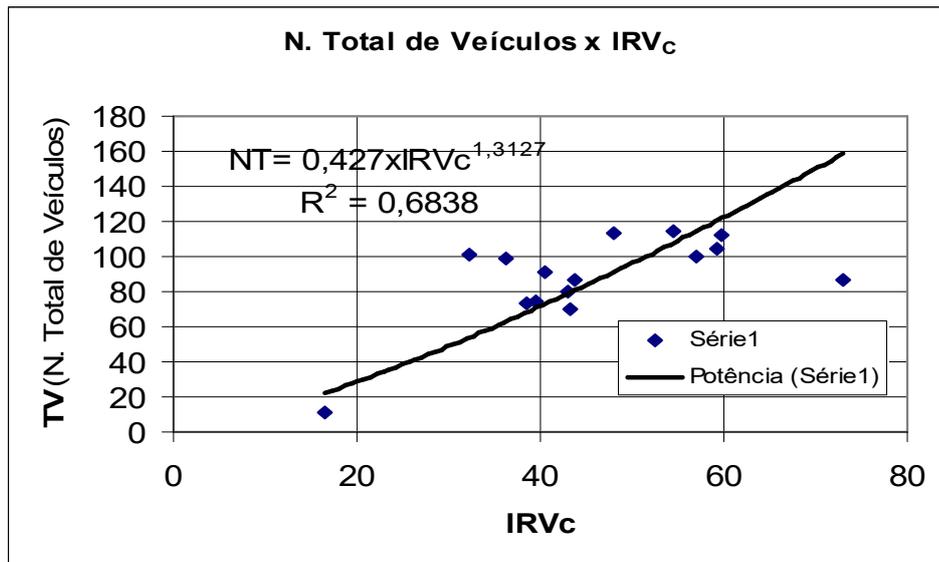


Do autor (2023)

Vel. Limite = permitida: $V=40$ km/h + 138% = 95,2 km/h; $f_t=0,38$; $f=0,39$; $M=14,2$ m

A Figura 44 corresponde aos dados do gráfico da Figura 43, com valores de superelevação desconsiderados. A regressão foi otimizada, com velocidade inicial 40 km/h, excesso de velocidade 133%; coeficiente de atrito longitudinal $f = 0,38$; coeficiente de atrito transversal $f_t=0,38$ e flecha do campo de visibilidade $M = 14,1$ m, gerando $R^2=0,68$. Há ligeira diminuição no valor de R^2 .

Figura 44 – Regressão entre N. de Veículos sem Vít. e IRV_c (BR 116, Guapimirim/RJ), sem e



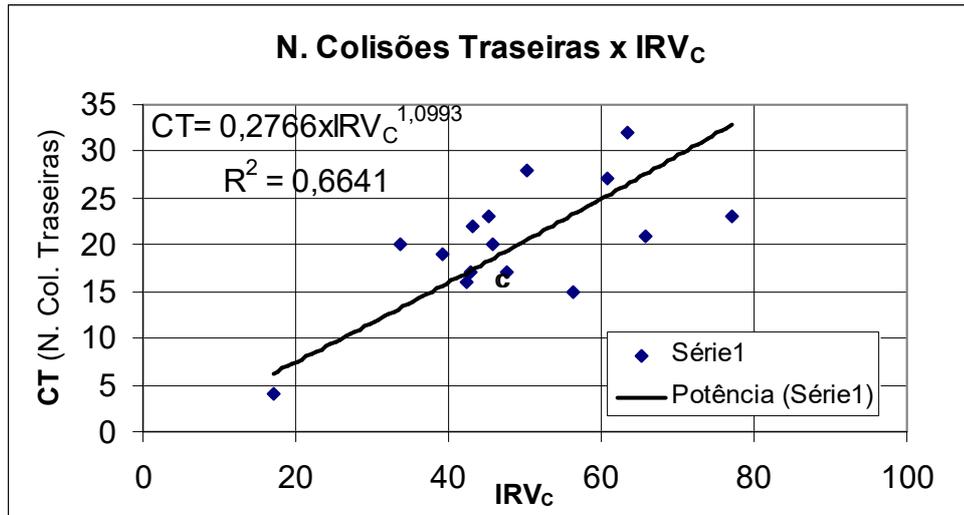
Do autor (2023)

Vel. Limite = permitida: $V=40$ km/h + 133% = 93,2 km/h; $f_t=0,38$; $f=0,38$; $M=14,1$ m

Na Figura 45, apresenta-se a regressão entre o número de colisões traseiras em acidentes sem vítima em relação aos valores de IRV_c , com velocidade inicial 40 km/h, excesso de velocidade 119%; coeficiente de atrito longitudinal $f = 0,25$; coeficiente de atrito transversal $f_t=0,25$ e flecha do campo de visibilidade $M = 17,7$ m, considerando as superelevações, gerando $R^2=0,66$.

Na Figura 46, reapresenta-se o gráfico da Figura 45, desconsiderando-se a superelevação. No processo de otimização do coeficiente de determinação, obteve-se $R^2=0,66$, ao se variar as grandezas que permitem flexão junto ao Modelo Arco-Íris; para excesso de velocidade 115%; coeficiente de atrito longitudinal $f = 0,26$; coeficiente de atrito transversal $f_t=0,26$ e flecha do campo de visibilidade $M = 18,7$ m. A desconsideração da superelevação praticamente não alterou a qualidade da correlação.

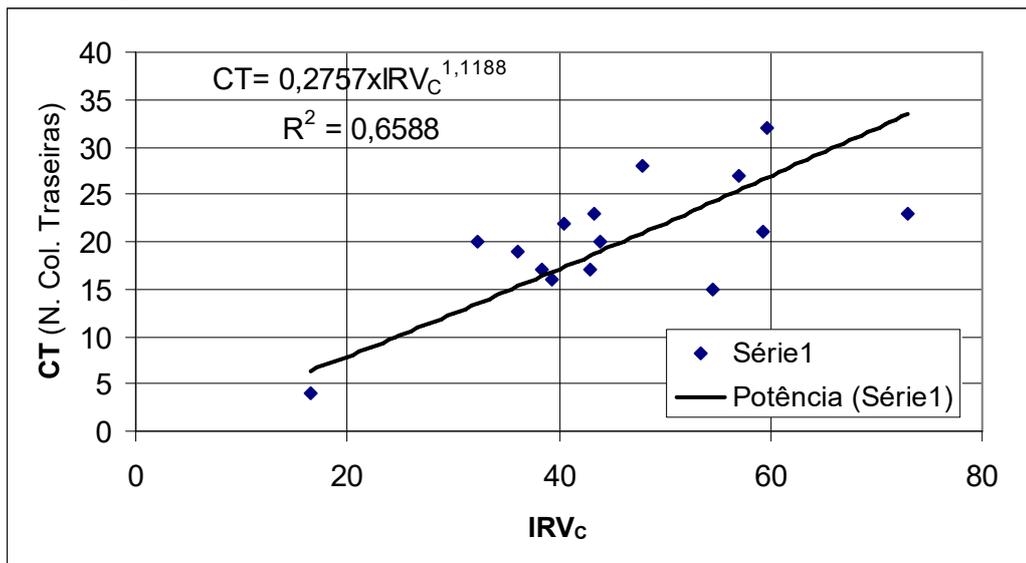
Figura 45 – Regressão entre Col. Traseiras sem Vít. e IRV_C (BR 116 Guapimirim/RJ)- com e



Do autor (2023)

Vel. Limite = permitida: $V=40 \text{ km/h} + 119\% = 87,6 \text{ km/h}$; $f_t=0,25$; $f=0,25$; $M=17,7\text{m}$

Figura 46 – Regressão entre o Col. Traseiras sem Vít. e IRV_C (BR 116, Guapimirim/RJ)- sem e



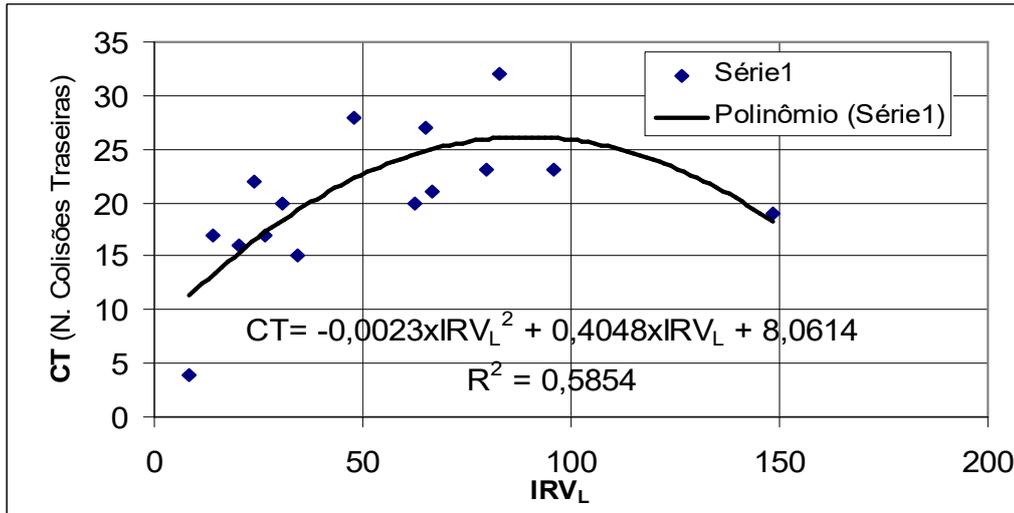
Do autor (2023)

Vel. Limite = permitida: $V=40 \text{ km/h} + 115\% = 86,0 \text{ km/h}$; $f_t=0,26$; $f=0,26$; $M=18,7\text{m}$

Na Figura 47, apresenta-se a regressão entre o número de colisões traseiras em acidentes sem vítima, em relação aos valores de IRV_L , que são melhores do que para a relação com os valores de IRV_C , para as mesmas condições de análise. A velocidade inicial, 40 km/h, apresentou acréscimo de excesso de velocidade em 40%; coeficiente de atrito longitudinal $f = 0,24$; coeficiente de atrito transversal $f_t=0,27$ e flecha do campo de visibilidade $M = 15,5 \text{ m}$, considerando as superelevações, gerando $R^2=0,59$. Na Figura 48, apresenta-se gráfico para as mesmas condições da Figura 47, sem considerar a superelevação, gerando

$R^2=0,60$. Nesta condição, a consideração da superelevação reduziu o coeficiente, em um centésimo. A regressão Polinomial dos gráficos das Figuras 47 e 48 indica valores de inversão de risco, para IRV_L superiores a aproximadamente 90 e 35, respectivamente, possivelmente por extensão excessiva de comprimento de aceleração.

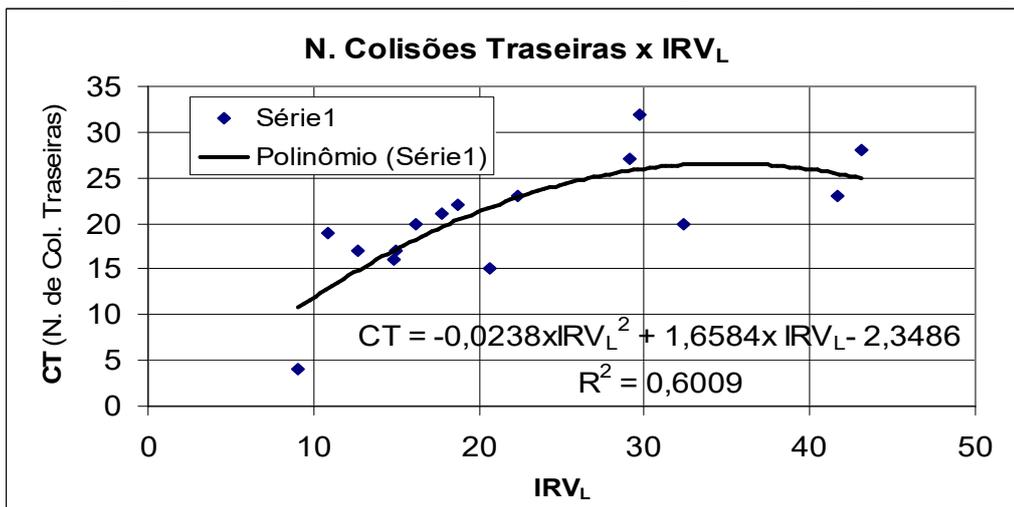
Figura 47 – Regressão entre o N. Col. Tras. sem Vít. e IRV_L (BR 116 – Guapimirim/RJ)- com e



Do Autor (2023)

Vel. Limite = permitida: V=40 km/h + 40%=56,0 km/h; ft=0,27; f=0,24; M=15,5 m

Figura 48 – Regressão entre o N. Col. Tras. sem Vít. e IRV_L (BR 116 – Guapimirim/RJ)- sem e



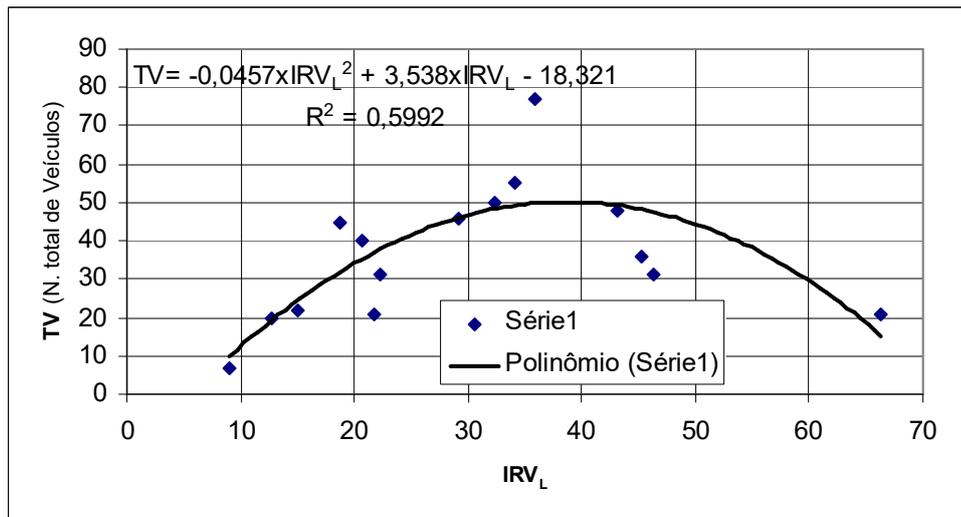
Do Autor (2023)

Vel. Limite = permitida: V=40 km/h + 48% = 59,2 km/h; ft=0,22; f=0,22; M=13,9 m

Na Figura 49, apresenta-se a regressão entre o número total de veículos, em acidentes com vítima, em relação aos valores de IRV_L, que são melhores do que para a mesma relação com os valores de IRV_C. A velocidade inicial, 40 km/h, sofre

excesso de velocidade 49%; coeficiente de atrito longitudinal $f = 0,27$; coeficiente de atrito transversal $f_t = 0,26$ e flecha do campo de visibilidade $M = 12,2$ m, desconsiderando as superelevações. Acarretou em um $R^2 = 0,60$, na regressão polinomial, onde se observa que, a partir de valores de IRV_L superiores a 40, a relação se torna inversa, ampliando o volume de dados com a abordagem de IRV_L que indicam valor máximo, sob possível influência da extensão de aceleração.

Figura 49 – Regressão o N. Total de Veíc. com Vít. e IRV_L (BR 116, Guapimirim/RJ)- sem e



Do Autor (2023)

Vel. Limite = permitida: $V = 40 \text{ km/h} + 49\% = 59,6 \text{ km/h}$; $f_t = 0,26$; $f = 0,27$; $M = 12,2 \text{ m}$

5 CONCLUSÃO

A abordagem tradicional de segurança rodoviária muitas vezes não considera a inter-relação entre as variáveis geométricas e os tipos de acidentes. A proposta deste trabalho foi explorar e validar modelos capazes de estimar o risco rodoviário levando em consideração essa inter-relação de forma mais precisa.

O Modelo Cabo de Guarda-Chuva, apesar de fornecer uma estrutural inicial, mostrou limitações quando aplicado em trechos de rodovias sinuosas, pois pressupunha aceleração contínua ao longo das tangentes e curvas de raio elevado. Os coeficientes de correlação obtidos entre os valores de IRV e os acidentes foram baixos, evidenciando a necessidade de aprimoramento.

O Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado acarretou melhoria na qualidade das correlações ao inserir critério de raio máximo que ainda imporia restrição à velocidade. Este critério associa o Número Limite de Restrição de Aceleração em Curvas (N_{LIM}) à trajetória de possível aumento de velocidade, mas não estabelece limite à extensão desta trajetória. O valor máximo de $R^2=0,72$ para capotamentos, no trecho de serra da SP 98, demonstrou a eficácia desta abordagem.

O Modelo Arco-Íris incorporou princípios cinemáticos, considerando a velocidade e coeficientes equivalentes de atrito. Esta evolução permitiu obter coeficientes de determinação ainda maiores, atingindo $R^2=0,81$ para tombamentos na SP 98; e $R^2=0,69$ para acidentes em geral e sem vítimas na BR 116, validando a eficácia do modelo.

As regressões obtidas podem ser aplicadas em estudos de risco associado à consequência, válidas para vias semelhantes às que se busque conhecer o nível de risco para se associar a potencialidade de mortes ou impactos financeiros devidos a sinistros. Permitem estudos de melhorias em projetos ou vias existentes, antes que se precise aguardar a concentração de acidentes. Os modelos analisados também poderão embasar estudos de aprimoramento de normas viárias, por permitir estabelecer novos limites ou premissas de projeto com base em risco de ocorrência de acidentes e custos de efetivação de melhorias. A análise integrada é avanço em relação ao estudo isolado de cada grandeza e risco. Quando se analisam elementos viários de forma isolada, não se considera a influência de um elemento sobre o outro. Uma determinada magnitude de raio de curvatura pode acarretar maior risco

operacional do que outra curva de mesmo raio, caso a primeira seja precedida por longa declividade em tangente.

A definição da contribuição e viabilidade de instalação de sistemas *traffic calming* também pode ser avaliada segundo o IRV.

O Modelo ofereceu *insights* importantes sobre o risco operacional e permitiu a identificação de velocidades prováveis de ocorrência de acidentes, algo inovador no campo de segurança rodoviária.

A aplicabilidade prática do Modelo Arco-Íris, além de permitir a análise de risco rodoviário de forma integrada e precisa, abre caminho para várias aplicações práticas, tais como:

a. Estabelecimento de Velocidade Permitida: fornece uma base quantitativa para determinar a velocidade permitida em cada trecho, considerando as ocorrências de acidentes e geometria da via.

b. Simuladores de Treinamento: pode ser incorporado em simuladores de treinamento para reviver cenários de risco e melhorar a conscientização dos motoristas.

c. Avaliação de infrações: permite inferir a velocidade provável de ocorrência de um tipo específico de acidente, fornecendo dados objetivos para análises forenses.

d. Aprimoramento de normas rodoviárias: a modelagem pode embasar o desenvolvimento de normas viárias mais precisas, estabelecendo limites de projeto baseados em riscos reais.

Este trabalho demonstrou a importância de considerar múltiplos fatores na análise de risco rodoviário. Ao se integrar variáveis como velocidade, declividade, raio horizontal e superelevação; foi possível obter coeficientes de correlação significativos entre os valores de IRV e os acidentes. O Modelo Arco-Íris provou-se eficaz em fornecer melhor compreensão sobre os riscos operacionais, contribuindo para uma abordagem mais abrangente e precisa na segurança rodoviária.

Esta nova abordagem entre geometria rodoviária e bancos de dados de acidentes, proporcionada pelo Modelo Arco-Íris, deve ser objeto de outras investigações para a busca de bancos de dados ideais e as condições limites de aplicação.

Deve-se avançar a pesquisa, além do Modelo proposto, para a validação universal do Modelo Arco-Íris em diferentes bancos de dados de acidentes e

geometria rodoviária em rodovias semelhantes às já analisadas. Novas pesquisas podem ser efetivadas para trechos rodoviários de vias não sinuosas, compostas por reduzido número de curvas horizontais em cada trecho de estudo.

Outra abordagem sugerida é o estudo da contribuição do Modelo com grandezas isoladas, com regressões que associem diversos trechos entre si. Rodovias em pista dupla de mão única também devem compor cenário de pesquisa, visando verificar a possibilidade de aplicação do Modelo.

Concessionárias de rodovias podem estimar o montante financeiro relativo à minimização de vítimas graves, mortes, serviços de socorro, perda veicular, mobiliário viário dentre outros custos com base em regressões do Modelo, desenvolvidas em trecho similar e o comparar aos custos de melhorias na análise de viabilidade econômica.

Este trabalho também pode contribuir na análise de larguras de faixas de rolamento, quanto à flexibilidade de percurso associada à geometria em planta. Novas pesquisas quanto à estrutura do Modelo podem aprimorar a determinação da velocidade de sinistro em curva, considerando outras grandezas ou formas distintas de interação entre os valores.

REFERÊNCIAS

5 PONTOS para se Falar no Aniversário de 40 anos da Mogi-Bertioga. **O Diário de Mogi**, Mogi das Cruzes, 13 maio. 2022. Disponível em:

<https://odiariodemogi.net.br/cidades/5-pontos-para-se-falar-no-aniversario-de-40-anos-da-mogi-bertioga-1.48616>. Acesso em: 26 nov. 2023.

AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 4. ed., 2001. ISBN 1-56051-156-7. Disponível em <https://archive.org/details/aashto-2001/page/n7/mode/2up>. Acesso em: 10 jan.2024.

AASHTO. **A policy on geometric design of highways and streets**. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 7. ed., 2018. ISBN 978-1-56051-676-7. Disponível em:<https://kankakeerecycling.com/wp-content/uploads/2023/04/THE_GREEN_BOOK_A_Policy_on_Geometric_Des.pdf>. Acesso: 10 jan. 2024.

AKIN, D.; SISOPIKU, V. P.; ALATEAH, A. H.; ALMONBHI, A. O.; AL-THOLAIA, M. M. H.; AI-SODANI, K. A. A. Identifying Causes of Traffic Crashes Associated with Driver Behavior Using Supervised Machine Learning Methods: Case of Highway 15 in Saudi Arabia. **Sage Publications**. 2022, issue 24, 36 p., p. 16654, 2022. DOI: 10.3390/su142416654. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142416654>. Acesso em 1 ago. 2024.

ALENCAR, J. R. É inconstitucional diz OAB. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 1 abr. 1989, p. 50. Disponível em: <https://acervo.estadao.com.br/pagina/#!/19890401-35003-nac-0050-999-50-not>. Acesso em: 13 fev. 2023.

ALMEIDA, E. S. de. A Duplicação da Rodovia Fernão dias: Uma Análise de Equilíbrio Geral. *In*: 50º Encontro Nacional de Economia ANPEC 2004 - Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia, 2004, João Pessoa. **Anais** [...]. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. Disponível em: <https://www.anpec.org.br/encontro2004/artigos/A04A130.pdf>. Acesso: 29 jan. 2023.

ARANDA, F. Dobramos os que Assumem Beber e Dirigir. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 20 set. 2008. Cidades/metrópole, p. 10. Disponível em: <https://acervo.estadao.com.br/pagina/#!/20080920-41976-spo-67-cid-c10-not/busca/lei+seca>. Acesso: 2 mai. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PREVENÇÃO DOS ACIDENTES DE TRÂNSITO. **Estatísticas nacionais de acidentes de trânsito**. 2018. Disponível em: http://www.vias-seguras.com/layout/set/print/os_acidentes/estatisticas/estatisticas_nacionais. Acesso em: 20 abr. 2018.

BARBOSA, E.P.; STIPP JR., A. Novo atraso na Rio-Santos. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 4 jan. 1975. Disponível em: <https://acervo.estadao.com.br/pagina/#!/19750104-30606-nac-0060-999-60-not/busca/Santos+Angra+Reis>. Acesso em: 8 jul. 2019.

BERRY, T. **The First True Motor Scraper**. [S.l.], 21 jan. 2022. Disponível em: <https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/trends/article/22005313/historical-construction-equipment-association-hcea-the-first-true-motor-scraper>. Acesso em: 1 set. 2024.

BRASIL. Decreto-lei nº 512, de 21 de março de 1969. Regula a Política Nacional de Viação Rodoviária, fixa diretrizes para a reorganização do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 mar. 1969.

BRASIL. Lei Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 set. 1997.

BRASIL. Lei Nº 11.334, de 25 de julho de 2006. Alterações no Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 jul. 2006, p. 9.

BRASIL. Lei Nº 11.705, de 19 de junho de 2008. Alterações no Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 jun. 2008, p. 1

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Resolução 380 de 28 de abril de 2011** – Obrigatoriedade do uso de Sistema Antitravamento das Rodas – ABS. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 mai. 2011.

BRASIL. Tribunal de Justiça do Estado do Paraná. Apelação Cível nº. **Ação de Indenização por Dano Material e Moral**. São Mateus, 2015. <<https://www.jusbrasil.com.br/busca?q=BARRO+NA+PISTA>>. Acesso em: fev 12, 2023.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Resolução 882 de 13 de dezembro de 2021** – Obrigatoriedade do uso de Sistema Antitravamento das Rodas – ABS. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 dez. 2011. Ed. 242, seção 1, p. 153.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Resolução CONTRAN Nº 964 de 17 de maio de 2022-a**. Obrigatoriedade do uso do equipamento suplementar de segurança passiva. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 mai. 2022. Seção 1, p. 444.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Frota de Veículos**. Brasília, DF. 2022-b. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021>. Acesso em: 30 mar. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Resolução 994 de 15 de junho de 2023** – Limites de peso e dimensões de veículos que transitam por vias terrestres. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 jun. 2023. Ed. 117, seção 1, p. 327.

BRAZ, J. T. **Recomendações Funcionais – II Superelevações, Superlarguras e Tangente mínima**. São Paulo: CET, 1994. 13 p. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/20695/nt178.pdf>. Acesso em: 2 set. 2024.

BROSSI, A. A. **Estudo do desempenho de frenagem de um ônibus biarticulado**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2002. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-03032017-153945/publico/Dissert_Brossi_AlexandreA_corrigido.pdf. Acesso em 27 jan. 2023.

CARVALHO, C. H. R. de. **Custos dos acidentes de trânsito no Brasil**: estimativa simplificada com base na atualização das pesquisas do IPEA sobre custos de acidentes nos aglomerados urbanos e rodovias. IPEA. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/atlasviolencia/arquivos/artigos/7018-td2565.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2023.

CHIMBA, D.; SANDO, T.; KWIGIZILE, V. Effect of Bus Size and Operation to Crash Occurrences. **Accident Analysis & Prevention**, v. 42, p. 2063-2067, 2010.

CONCESSIONÁRIA RIO-TERESÓPOLIS: S/A: **Relatório da Administração 2022**. Rio de Janeiro: EcoRioMinas, 2022. Disponível em: https://s3.glbimg.com/v1/AUTH_63b422c2caee4269b8b34177e8876b93/valorri-uploads/bs/2022/r/A/x564BfRFim6QCBFFLDQw/crt-15607143-03032022-certificado-1-.pdf. Acesso: 29 nov. 2023.

DENATRAN-DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota de Veículos 2016**. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/frota2016.htm>. Acesso em: 8 set. 2016.

DER - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM: **Estatística de Tráfego Volume Diário Médio por Rodovia**. 2023. Disponível em: <http://200.144.30.103/vdm/>. Acesso em: 29 nov. 2023.

DETRAN-INFOSIGA.SP - **Sistema de Informações Gerenciais de Acidentes de Trânsito do Estado de São Paulo** – Painel de Resultados. São Paulo, 2022. Disponível em: http://painelderesultados.infosiga.sp.gov.br/dados.web/ViewPage.do?name=obito_s_publico&contextId=8a80809939587c0901395881fc2b0004. Acesso em: 6 dez. 2023.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Ed. 1. Rio de Janeiro, 1999. p.706. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/706_manual_de_projeto_geometrico.pdf. Acesso em: 8 jul. 2019.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários**: escopos básicos / instruções de serviço. Publicação IPR – 726. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/726_diretrizes_basicas-escopos_basicos-instrucoes_de_servico.pdf. Acesso em: 8 jul. 2019.

EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO. **Número de Mortos em Acidente com ônibus no Rio chega a 15**. 24 de outubro de 2014. Disponível em: <https://memoria.ebc.com.br/2012/10/numero-de-mortos-em-acidente-com-onibus-no-rio-chega-a-15>. Acesso em: 29 nov. 2023.

EBOLI, L.; G. MAZZULLA and G. PUNGILLO (2016). Measuring Bus Comfort Levels by using Acceleration Instantaneous Values. **Transport Research Procedia**, n. 18, p. 27-34. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.12.004.

ENCYCLOPEDIA Britannica. Chicago: William Benton Publisher, 1964. v. 24.

ENO CENTER OF TRANSPORTATION. **Our History**: William Phelps Eno. 2019. Disponível em: <https://enotrans.org/our-history/>. Acesso em: 5 jul. 2019.

ESTEVEES, R. **Cenários urbanos e traffic calming**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: [http://www.vias-seguras.com/infraestrutura/moderacao do trafego/cenarios urbanos e traffic calming](http://www.vias-seguras.com/infraestrutura/moderacao%20do%20trafego/cenarios%20urbanos%20e%20traffic%20calming). Acesso em jan 30, 2023.

EVGENIKOS, P.; YANNIS, G.; FOLLA, K.; BAUER, R.; MACHATA, K.; BRANDSTAETTER, C. Characteristics and causes of heavy goods vehicles and buses accidents in Europe. **Transportation Research Procedia**, n. 14, p. 2158-2167, 2016. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.231.

FERRAZ, A. C. P. “Coca” et al. (2012). **Segurança rodoviária**. Curitiba, PR. Ed. Câmara Brasileira do Livro, 2023. Disponível em <https://eesc.usp.br/comunicacao-admin/wp-content/uploads/2024/04/Livro-Seguranca-no-Transito.pdf>. Acesso em 02.mar.2024.

FERREIRA, A.; JUSTO-SILVA, R. Accident Prediction Models Considering Pavement Quality. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD AND RAIL INFRASTRUCTURE, 4., 2018, Zadar, Croácia. **Anais [...]**. Zadar: International Conference on Road and Rail Infrastructure. p. 6.

FHWA-FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Procedures for Setting Advisory Speeds on Curves**. Washington: FHWA Safety Program 2011. Disponível em: https://safety.fhwa.dot.gov/speedmgmt/ref_mats/fhwasa1122/fhwasa1122.pdf. Acesso: 23 fev. 2023.

FREITAS, L. M. (2005). **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo MacPherson**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. 122 p. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-19012011-114031/publico/DissertacaoMestradoLuisMauro.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2023.

FWA, T. F. **The handbook of highway engineering**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. Disponível em: <https://books-library.net/files/download-pdf-ebooks.org-1550166612-453.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2023.

GARCÍA-RAMIREZ, Y. D.; AGUILLAR-CÁRDENAS, D. Passengers' Comfort in Horizontal Curves on Mountain Roads: A Field Study Using Lateral Accelerations. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 98, p. 94-103, 2021.

GLOBAL ROAD SAFETY PARTNERSHIP. International Federation of Red Cross And Red Crescent Societies. **Drinking and driving: key issues**. 2015. Disponível em: <https://www.grsproadsafety.org/wp-content/uploads/2023/03/GRSP-Drinking-and-Driving-Fact-Sheet-2.pdf>. Acesso em: 2 mai. 2019

HABIB, K.; TAWFEEK, M. H.; EI-BASYOUNY. A System to Determine Advisory Speed Limits for Horizontal Curves Based on Mental Workload and Available Sight Distance. **Canadian Science Publishing**. 2022, issue 3, vol. 49, pp. 445-451. 2022. DOI: 10.1139/cjce-2020-0482.

HAUER, E. Safety of Horizontal Curves – Review of Literature for the Interactive Highway Safety Design Model. **Journal of the Transportation**. Jan.1999, issue 1, vol. 1665. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/toc/trra/1665/1>. Acesso em: 4 nov. 2018.

HAUER, E. Safety in Geometric Design Standards I: Three Anecdotes. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGHWAY GEOMETRIC DESIGN, 2., 2000, Mainz. **Anais [...]**. Mainz: International Symposium on Highway Geometric Design, 2000. p. 12. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228903642_Safety_in_geometric_design_standards. Acesso em: 2 nov. 2018

HU, Q.; LI, X.; LIU, J.; ADANU, E. K. A low-cost approach to identify hazard curvature for local road networks using open-source data. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, jun. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/transportation-research-interdisciplinary-perspectives/vol/10/suppl/C>. Acesso em: 29 jan. 2023.

HUTING, J.; REID, J.; NWOKE, U.; BACARELLA, E.; KIM, E. K. Identifying Factors That Increase Bus Accident Risk by Using Random Forests and Trip-Level Data. **Transportation Research Record**, n. 2539, p. 149-158, 2016. DOI: 10.3141/2539-17.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de 2010**. Brasília: IBGE, 2016. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=sp>. Acesso em: 8 set. 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de 2022**. Brasília: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 12 dez. 2023.

INFORME PARANÁ COOPERATIVO. Infraestrutura. **Com Investimentos de R\$ 1,1 bilhão, Estado vai entregar 250 km de Obras Rodoviárias em 2022.** 28 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.paranacooperativo.coop.br/noticias-representacao/infraestrutura-com-investimentos-de-r-1-1-bilhao-estado-vai-entregar-250-km-de-obras-rodoviaras-em-2022-139038>. Acesso em: 27 jan. 2023.

IPEA (Brasília) – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras.** 2006. Disponível em: http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2012/11/26/20D7C7E4-1D9D-4CF4-B9E6-DBFD3165962C.PDF. Acesso em: 8 set. 2016.

IPEA (Brasília) – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: Caracterização, Tendências e Custos para a Sociedade.** Brasília: IPEA e PRF, 2015. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7493/1/RP_Acidentes_2015.pdf. Acesso em: 23 out. 2023.

iRAP. (2021) Federative Republic of Brazil iRAP – **Pilot technical report federal highways.** Basingstoke, UK. Disponível em: <https://irap.org>. Acesso em: 10 jan. 2024

KHORASANI-ZAVAREH, D.; BIGDELI, M.; SOHEIL SAADAT, S.; MOHAMMADI, R. Kinetic energy management in road traffic injury prevention: a call for action. **National Library of Medicine.** 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4288294/>. Acesso: 23 jan. 2023.

LAMM, Ruediger. Attempts for Reducing Traffic Accidents in a Country. **Road And Construction**, Germany, n. 10, p.14-22, 1980.

LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M. **A comparative analysis of operation speeds and accident rates on two-lane rural highways.** Dissertation (Doctor of Philosophy) - Department of Civil Engineering, Clarkson University. Potsdam, New York, 1987.

LAMM, R.; PSARIANOS, B.; THEODOR MAILAENDER. **Highway design and traffic safety engineering handbook.** New York: Mcgraw-Hill, 1999.

LEUTZBACH, W.; ZOELLMER, J. **Relationship between traffic safety and highway design elements.** Bonn: Bundesministerium Für Verkehrs Und Digitale Infrastruktur, 1989. 56 p. (ISSN: 0344-0788).

LI, D.; Zhao, Y.; Bai, Q.; Zhou, B.; Ling. H. Analyzing injury severity of bus passengers with different movements. **Traffic Injury Prevention**, 2017, v. 18, n. 5, p. 528-532. DOI: 10.1080/15389588.2016.1262950.

LO, Y; CHIU, A.; TSENG, P. Driving frequency modulates correlations between executive functions and driving performance: A driving simulator study. **Perceptual & Motor Skills.** 2023, issue 6, vol. 130, p. 2410-2429.2023. DOI 10.1177/00315125231209646.

MACEDO, M. R. O. B. C. **Metodologia baseada em SIG para predição de acidentes em rodovias rurais de pista simples**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/38383/1/TESE%20M%c3%a1rcia%20Rejane%20Oliveira%20Barros%20Carvalho%20Macedo.PDF>. Acesso em: 15 fev. 2023.

MATTHEWS, L.R; BARNES, J.W. (1988). **Relation between Road Environment and Curve Accidents**. Proceedings of 14th ARRB Conference, Canberra, 28 August-2 September 1988, 105-120.

MERCEDES BENZ GROUP MEDIA. **August 1959: Mercedes-Benz Introduces the Safety Body**, 2009. Disponível em: <https://mbclub.is/spjallid/1/14518>. Acesso em: 13 de jan. 2023.

ABBOUD, N. K.; BOWMAN, B. L. Evaluation of Two- and Four-Foot Shoulders on Two-Lane State Routes. **Ite Journal**, Washington, jun. 2001, p.34-39. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/4059/11833320419f1709fed15229b0c31d60fd0a.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2018.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Transportation Research Board. **NCHRP Report 480: A Guide to Best Practices for Achieving Context Sensitive Solutions**. Washington, 2002. 151 p. (ISBN 0-309-06770-7). Disponível em: https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_480.pdf. Acesso em: 6 mai. 2019.

NOOIJ, S.A.E., NESTI, A., BÜKTHOF, H.H. *et al.* (2016). **Perception of rotation, path, and heading in circular trajectories**. *Exp Brain Res* 234, 2323–2337 (2016). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00221-016-4638-0>, Acesso em 25 ago. 2023.

Portal ONSV. Violência no trânsito mata tanto quanto a violência pública. **Observatório Nacional de Segurança Viária**, Indaiatuba, 6 mar. 2018. Disponível em: <https://www.onsv.org.br/observatorio-afirma-violencia-no-transito-tambem-e-violencia-publica/>. Acesso em: 2 nov. 2018.

PEDROSO, L. G. **Custo da infraestrutura rodoviária - análise e sistematização**. 2001. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2809/000326413.pdf?sequence=1>. Acesso em: 27 jan. 2023.

PEIXOTO, C. de F., FRANÇOSO, M. T., MONARI, M., & SEGANTINE, P. C. L. (2023). Investigating the relationship between road geometry and severe bus accidents in Brazil. **Brazilian Journal of Development**, 9(1), p. 929–945. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n1-065>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/55996/41147>. Acesso em: 27 ago. 2023.

PEIXOTO, C. F.; FRANÇOSO, M. T. (2021). The Safety Highway Geometry Based On Unbalanced Centripetal Acceleration. *In: The 18th IRF World Meeting and Exhibition, XVIII, 2021, Dubai/UAE. Anais [...].* Proceedings. Publishing City: Editor, 2021. pp. 837-849.

PEIXOTO, C. de F.; PAIVA, C. de. Auditoria de segurança rodoviária: Uma carência brasileira. **Revista de Engenharia**, São Paulo, p.96-98, 2011. Disponível em: <http://issuu.com/www.viapapel.com.br/docs/606/1?zoomed=&zoomPercent;=&zoomX;=&zoomY;=-eText;=-eX;=-eY;=&viewMode=magazine>. Acesso em: 8 set. 2016.

PITMAN, G. E. **Sewing the rainbow: the story of Gilbert Baker and the rainbow flag.** 1st Edition. Washington: Magination Press, 2018.

PONTES FILHO, G. **Estradas de rodagem: projeto geométrico.** São Carlos: [s.n.], 1998. Disponível em: https://www.academia.edu/34684124/Livro_Estradas_de_Rodagem_Projeto_geométrico_Glauco_Pontes_Filho. Acesso em: 31 jan. 2023.

PORTAL DO TRÂNSITO E MOBILIDADE. **Mesmo com a Pandemia Número de Mortes por Acidentes de Trânsito Cresce.** 2023. Disponível em <https://www.portaldotransito.com.br/noticias/fiscalizacao-e-legislacao/estatisticas/mesmo-com-a-pandemia-numero-de-mortes-por-acidentes-de-transito-cresce-no-brasil/>. Acesso em: 24 out. 2023.

PRÁTICO, F. G. Speed Limits and Pavement Friction: A Theoretical and Experimental Study. **The Open Transportation Journal**, v.12, abr. 2018; DOI: 10.2174/18744478018120100139. Disponível em: <https://benthamopen.com/FULLTEXT/TOTJ-12-139>. Acesso em: 6 jul. 2019.

RADIMSKY, M.; MATUSZKOVA, R.; BUDIK, O. Relationship between horizontal curves design and accident rate. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 5–2, 2015 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8493>. Acesso em: 15 fev. 2023.

RAHMAN, M.; KATTAN, L.; TAY, R. Injury Risk in Collisions Involving Buses in Alberta, Canada. **Sage Journals**, n. 2265, issue 1, p. 13-26, 2011. DOI: 10.3141/2265-02.

RAMOS, A. Double Decker 8x2 ganha espaço no transporte turístico. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 22 jun. 2020. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/double-decker-8x2-ganha-espaco-no-transporte-turistico/>. Acesso: 30 mar. 2022.

ROAD AND TRANSPORTATION RESEARCH ASSOCIATION. **Guidelines for the Design of Motorways.** 2008. Disponível em: https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/202_E_PDF.v.pdf. Acesso em: 24 jan. 2023.

ROCHA, G. L.; SANTANA, J.; RODRIGUES, LG. Ônibus com Universitários Tomba na Mogi Bertioga e Mata ao Menos 10. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 9 jun. 2016. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2016/06/1779797-onibus-com-universitarios-tomba-na-mogi-bertioga-e-mata-ao-menos-10.shtml>. Acesso em: 28 nov. 2023.

SALES, G. L.; MAIA, M. C. **Física Básica I Licenciatura em Matemática**. Fortaleza, 2011. 124 p. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/429546?mode=full>. Acesso em: 25 jan. 2023.

SCHETTINO, M. *et al* (2022). From skinner box to daily life: Sign-tracker phenotype co-segregates with impulsivity, compulsivity, and addiction tendencies in humans. **Springer Nature**, Elsevier. University of Rome. Jun 2022, vol. 22, p. 1358-1379. DOI:10.3758/s13415-022-01014-y. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.3758/s13415-022-01014-y>. Acesso em: 25 jan 2023.

SCHUBERT, P.; LIEBHERR, M.; KERSTEN, S.; HAAS, C. T. Biomechanical demand analysis of older passengers in a standing position during bus transport. **Journal of Transport & Health**, 2017, v. 4, p. 226-236.

SETTI, J. R. A. **Tecnologia de Transportes**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo-EESC-USP, 2011. Disponível em: <https://pessoas.feb.unesp.br/barbara/files/2011/02/apostila-setti.pdf>. Acesso em 2 mai. 2019.

SHALA, F.; SHALABY, A. S.; PERSAU, B. N.; HADAYEGH, A. Analysis of transit safety at signalized intersections in Toronto, Ontario, Canada. **Transportation Research Record**, 2009, n. 2102, p. 108-114.

SILVA, M. C. Cinto volta às estradas. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 1 abr. 1989. p. 50. Disponível em: <https://acervo.estadao.com.br/pagina/#!/19890401-35003-nac-0050-999-50-not/busca/cinto+obrigatório+segurança>. Acesso em: 2 mai. 2019.

SINDIPEÇAS. **Relatório da Frota Circulante**. 2022. Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2022/RelatorioFrotaCirculante_2022.pdf. Acesso em: 22 dez. 2022.

SKINNER, B. F. The Concept of the Reflex in the Description of Behavior. **Journal of General Psychology**, 1931, v. 5, issue 4, p. 427-458. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221309.1931.9918416>. Acesso em 2 mai 2019.

STRASSENWESEN, Bundesanstalt Für (2008). **Überprüfung und Verbesserung der Grenzwerte zum Erkennen von Unfallhäufungen im Straßennetz**. Technische Universität Dresden. Dresden, 2008. Disponível em: [https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2054/file/Grenzwerte zum Erkennen von Unfallhaufungen.pdf](https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2054/file/Grenzwerte_zum_Erkennen_von_Unfallhaufungen.pdf) . Acesso em: 31 out. 2023.

SUN, L.; CHEN, L.; YIN, Y., TIAN, Y.; ZHANG, X. Risk Assessment of Rollover and Skidding due to Pavement Roughness and Differential Settlement for Enhancing Transportation Safety. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2021, issue 1, 15 pages, 2021. DOI: 10.1155/2021/7244283.

TSENG, C. M. Social-demographics, driving experience and yearly driving distance in relation to a tour bus driver's at-fault accident risk. **Tourism Management**, 2012, v. 33, n. 4, p. 910-915.

U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Understanding the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)**. WASHINGTON. 2017. Disponível em: <https://www.transportation.gov/transition/understanding-national-highway-traffic-safety-administration-nhtsa>. Acesso em: 1 mai. 2019.

VAYALAMKUZHI, P.; AMIRTHALINGAM, V. Development of Comprehensive Crash Models for Four-lane Divided Highways in Heterogeneous Traffic Condition. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION PLANNING AND IMPLEMENTATION METHODOLOGIES FOR DEVELOPING COUNTRIES, 12., 2014, Mumbai. **Anais [...]**. New York: Elsevier Editora Ltda, 2016. p. 9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516307323>. Acesso em: 12 jul. 2019.

VIAS SEGURAS. **Estatísticas Nacionais de Acidentes de Trânsito**. 2022. Disponível em: http://www.vias-seguras.com/layout/set/print/os_acidentes/estatisticas/estatisticas_nacionais. Acesso em: 22 dez. 2022.

VILELA, F. S. **Histórico do Código de Trânsito Brasileiro**. 2019. Escola Superior Dom Helder Câmara. Disponível em: <https://domtotal.com/direito/pagina/detalhe/38721/historico-do-codigo-de-transito-brasileiro>. Acesso em: 5 jul. 2019.

VIVEROS, H. P. **Análise do desempenho na frenagem de um cavalo mecânico e semi-reboque com suspensão mecânica e sistema ABS mediante simulação em Matlab/Simulink**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo EESC-USP, São Carlos, SP, 2010. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-09022011-120021/publico/MSc_ViverosHP_Desempenho_na_Frenagem.pdf. Acesso em: 31 jan. 2023.

WALLMAN, C. G.; STROM, H. **Friction Measurement Methods and the Correlation between Road Friction and Traffic Safety**-Literature Review. Sweden: Swedish National Road And Transport Research Institute, 2001. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:673366/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024

WASSERMAN, D.; RIXEY, A.; ZHOU, X.; LEVITT, D.; BENJAMIN, M. Evaluating OpenStreetMap's Performance Potential for Level of Traffic Stress Analysis. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 4, p. 284-294, 2019. DOI: 10.1177/0361198119836772.

WILSON, B.; HOFFMAN, J.; MORGENSTERN, J. **Predictive Inequity in Object Detection**. 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1902.11097>. Acesso em: 22 abr. 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **World report on road traffic injury prevention**. 2004. Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42871/9241562609.pdf;jsessionid=4D10EB0429E11143BA4AD044577AD565?sequence=1>. Acesso em: 1 nov. 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The top 10 causes of death**. 2018. Disponível em: <http://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>. Acesso em: 24 mai. 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Road traffic injuries**. 2023. Disponível em: <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. Acesso em: 11 set. 2024.

WRIGHT, P. H.; PAQUETTE, R. J. **Highway Engineering**. 5. ed. Chichester: Wiley, 1987. p. 717.

YIN, Y.; WEN, H.; SUN, L.; HOU, W. Study on The Influence of Road Geometry on Vehicle Lateral Instability. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2020, issue 1, 15 pages, 2020. DOI: 10.1155/2020/7943739.

ANEXO A – DADOS DE ACIDENTES DA SP 98 E DA RODOVIA RIO-TERESÓPOLIS

Na Tabela A1, apresenta-se os acidentes com vítima, ocorridos entre 2009 e 2018, na Rodovia Dom Paulo Rolim Loureiro, SP 98, que foram tratados e adaptados para esta forma de apresentação, utilizada para os testes dos Modelos. Na Tabela A2, apresenta-se os acidentes sem vítima correspondentes.

Tabela A1 – Acidentes com Vítima na SP 98 – Trecho de Serra – 2009 a 2018

km:	VÍTIMAS FERIDAS	VÍTIMAS FATAIS	Automóvel	Camionete/Camioneta	Caminhão/Caminhão Trator	Ônibus/Micrônibus	Motocicleta	Bicicleta	Outros Tipos de Veículos	colisão lateral, capotamento, tombamento, colisão transversal	capotamento, tombamento	tombamento	capotamento	colisão lateral	colisão Transversal
80	89	3	53	5	10	0	21	1	0	15	6	3	3	6	4
81	67	5	29	3	10	2	10	0	1	13	10	6	4	2	1
82	179	32	55	5	54	0	54	3	0	57	41	39	2	11	5
83	167	32	40	3	30	2	36	2	0	47	39	29	10	6	2
84	342	23	137	16	43	2	58	2	1	82	57	46	11	13	12
85	93	5	51	5	5	1	16	3	0	22	14	11	3	6	2
86	168	6	81	7	10	5	40	2	0	52	33	28	5	8	11
87	73	3	36	6	7	2	22	0	0	24	18	14	4	4	2
88	257	7	138	22	3	2	55	4	1	74	48	39	9	13	13
89	80	3	31	6	5	2	10	0	0	13	10	7	3	0	3
90	113	4	44	5	4	0	38	3	0	44	38	32	6	3	3
91	171	12	75	6	5	2	48	1	0	54	35	33	2	10	9
92	23	0	8	0	0	0	9	0	0	8	8	7	1	0	0
Σ:	1822	135	778	89	186	20	417	21	3	505	357	294	63	82	67

DER/SP, adaptado pelo Autor (2023)

Tabela A3 Acidentes com Vítima na BR 116 – Guapimirim – 2009 a 2018**ACIDENTES COM VÍTIMA NA BR 116 GUAPIMIRIM - DE 2009 A 2018**

km	FT	VNL	VNG	VN	TV	IN	AP	QE	TB	CP	CL	CR	CE	CT	CF	SP	DC	DA
89	0	10	2	12	7	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
90	1	35	7	42	50	0	0	2	2	0	3	3	0	5	9	3	0	0
91	3	34	2	36	48	0	0	4	5	2	7	1	1	3	2	1	0	0
92	1	17	9	26	21	0	0	1	3	1	1	2	0	1	2	2	0	0
93	1	15	1	16	22	0	0	1	2	0	1	0	2	2	3	2	0	0
94	2	24	12	36	31	0	2	4	2	2	2	1	1	1	4	2	0	0
95	7	46	20	66	77	0	0	8	3	0	8	4	2	1	12	2	0	0
96	0	51	8	59	21	0	0	3	2	1	1	0	2	0	5	0	0	1
97	1	14	9	23	31	0	1	0	3	0	2	0	0	5	4	0	0	0
98	0	49	6	55	45	0	0	4	4	2	4	1	0	6	4	1	0	0
99	0	54	5	59	46	0	1	7	7	2	2	3	1	2	3	5	0	0
100	0	23	4	27	20	0	0	0	0	1	2	1	2	0	3	4	0	1
101	2	31	6	37	36	0	3	3	1	2	1	5	1	0	4	3	0	0
102	16	43	23	66	55	0	1	9	2	0	6	1	2	1	5	6	0	0
103	1	27	12	39	40	0	2	5	3	0	3	5	1	1	2	3	0	0

DER/SP, adaptado pelo Autor (2023)

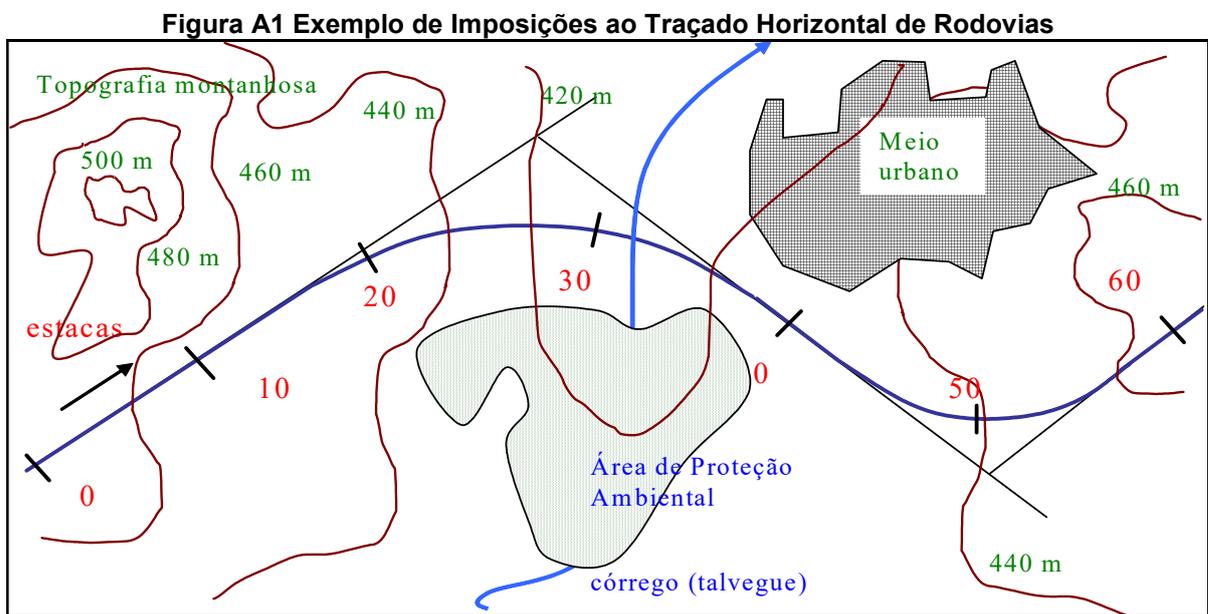
Tabela A4 Acidentes sem Vítima na BR 116 – Guapimirim – 2009 a 2018**ACIDENTES SEM VÍTIMA NA BR 116 GUAPIMIRIM - DE 2009 A 2018**

km	FT	VNL	VNG	VN	TV	IN	AP	QE	TB	CP	CL	CR	CE	CT	CF	SP	DC	DA
89	0	0	0	0	11	0	0	0	0	1	0	0	1	4	0	1	0	0
90	0	0	0	0	101	1	0	1	0	0	10	3	9	20	2	6	0	1
91	0	0	0	0	113	1	0	0	0	0	4	3	7	28	5	10	0	0
92	0	0	0	0	87	1	0	1	0	1	6	0	6	23	1	2	0	0
93	0	0	0	0	80	2	0	1	1	0	10	0	7	17	0	3	1	0
94	0	0	0	0	105	1	0	0	5	3	13	0	6	21	2	9	0	0
95	0	0	0	0	114	1	0	2	3	0	16	4	6	15	7	8	0	0
96	0	0	0	0	74	0	0	1	0	1	8	3	4	16	0	6	0	0
97	0	0	0	0	70	1	0	0	0	0	3	0	7	23	0	2	0	1
98	0	0	0	0	91	3	0	0	2	0	6	0	3	22	1	13	1	1
99	0	0	0	0	100	1	0	0	4	2	7	1	4	27	1	6	0	1
100	0	0	0	0	73	1	0	0	0	0	11	0	3	17	1	4	0	0
101	0	0	0	0	112	2	0	0	2	0	6	4	3	32	0	9	0	0
102	0	0	0	0	87	0	0	0	2	2	6	6	3	20	2	4	1	1
103	0	0	0	0	99	0	0	1	0	1	17	5	3	19	0	5	0	1

DER/SP, adaptado pelo Autor (2023)

APÊNDICE A – ESTABILIDADE EM CURVAS HORIZONTAIS

A geometria rodoviária impõe curvas à medida que obstáculos surjam ao longo da diretriz pretendida. As curvas do alinhamento horizontal rodoviário são estabelecidas em função de interferências ao longo do alinhamento proposto. Locais de alta densidade demográfica, topografia desfavorável, zonas de preservação ambiental e restrições político-sociais são exemplos dessas imposições, como exemplificado na Figura A1, que ilustra a projeção viária em planta.



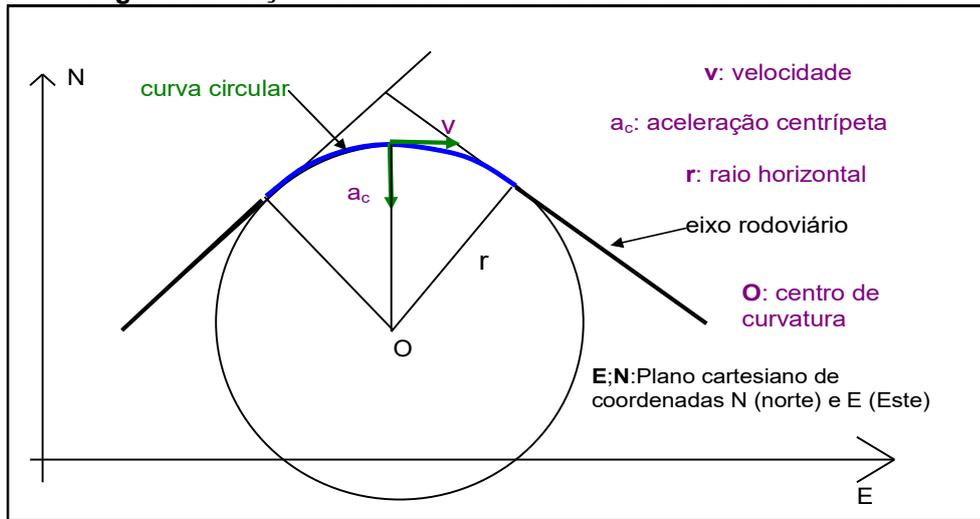
Fonte: Do autor (2023)

Ao se deslocar sobre uma superfície plana e horizontal, um veículo que passa de uma reta para uma curva é submetido à força centrípeta, resultante do produto entre a massa do veículo e a aceleração centrípeta, dada pela Equação A1.

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (\text{A1})$$

Esta equação, descrita por Sales e Maia (2011), é representada graficamente na Figura A2.

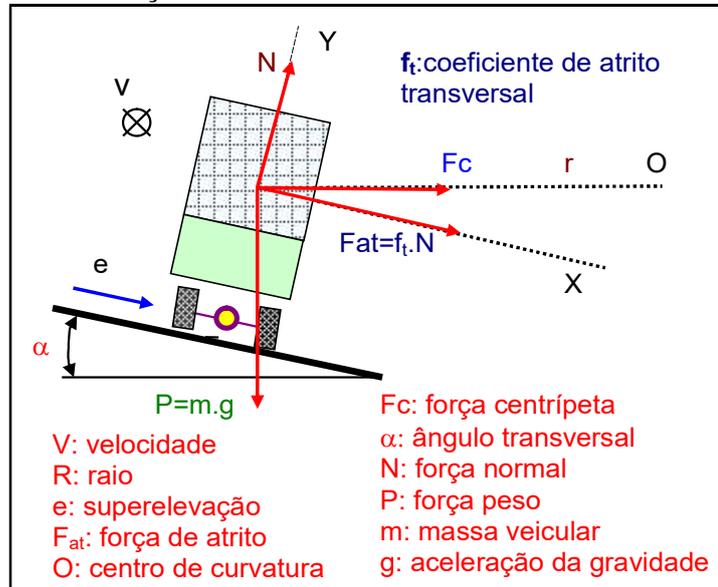
Figura A2 – Ações Cinemáticas em Curva Horizontal Rodoviária



Do autor (2023)

Pode-se deduzir uma equação baseada nas seguintes grandezas, com relação ao movimento circular em plano horizontal: força normal ao plano (N), força de atrito transversal (F_{at}), peso (P) e força centrípeta (F_c), conforme ilustrado na Figura A3.

Figura A3 – Forças Sobre Veículo em Curva Horizontal Rodoviária



Fonte: Do autor (2023)

A Equação A2 apresenta as parcelas da aceleração centrípeta, composta pela compensada e pela descompensada. A aceleração centrípeta descompensada é a parcela da total que exige que o motorista gire a direção para desenvolver força

de atrito transversal que garanta a permanência do veículo na faixa de tráfego. A aceleração centrípeta compensada corresponde ao produto da aceleração da gravidade com a superelevação, com caráter passivo quanto ao motorista.

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N = m \times g \times \cos(\alpha) + F_c \times \sin(\alpha)$$

$\Sigma F_x = 0$; dedução considerando o vetor F_c invertido, para somatória nula :

$$f_t \times m \times g \times \sin(\alpha) = F_c \times \cos(\alpha) \Rightarrow f_t \times N + m \times g \times \sin(\alpha) = F_c \times \cos(\alpha)$$

substituindo - se a Equação de N :

$$f_t \times [m \times g \times \cos(\alpha) + F_c \times \sin(\alpha)] + m \times g \times \sin(\alpha) = F_c \times \cos(\alpha)$$

$$f_t \times [m \times g \times \cos(\alpha) + \frac{m \times v^2}{R} \times \sin(\alpha)] + m \times g \times \sin(\alpha) = \frac{m \times v^2}{R} \times \cos(\alpha)$$

$$\left\{ f_t \times [m \times g \times \cos(\alpha) + \frac{m \times v^2}{R} \times \sin(\alpha)] + m \times g \times \sin(\alpha) = \frac{m \times v^2}{R} \times \cos(\alpha) \right\} \div [m \times \cos(\alpha)]:$$

$$f_t \times g + f_t \times \frac{v^2}{R} \times \operatorname{tg}(\alpha) + g \times \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{v^2}{R}; \text{ com : } \operatorname{tg}(\alpha) = e$$

os valores máximos de e e f_t são reduzidos, portanto o produto é nulo :

$$e_{\text{máx}} \times f_{t\text{máx}} \cong 0$$

$$f_t \times g + g \times e = \frac{v^2}{R}$$

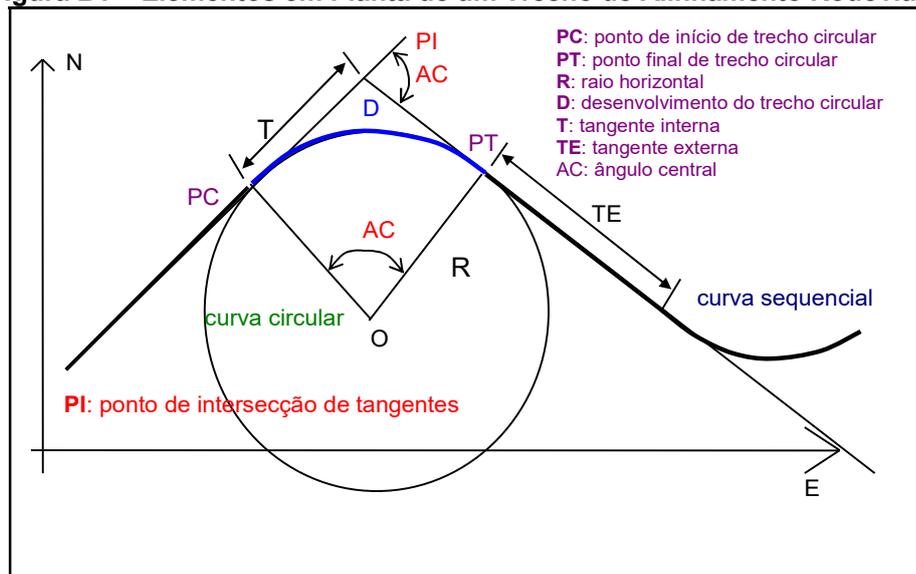
(A2)

APÊNDICE B – RAIOS MÍNIMOS DE CONCORDÂNCIA HORIZONTAL

A concordância entre curvas horizontais e segmentos retilíneos requer uma abordagem matemática para igualar o coeficiente angular das retas à derivada do círculo nos pontos de tangência. Por isso, é comum denominar estes segmentos como "tangentes". Em perfil longitudinal, são chamadas de tangentes verticais. Baseando-se neste princípio, tem-se continuidade matemática entre todos os pontos de alinhamento da rodovia.

Além do princípio matemático, a estabilidade veicular em curva, relacionada à aceleração centrípeta necessária, e a visibilidade em curvas também são fatores importantes. A Figura B1 apresenta os principais elementos das curvas horizontais circulares para fins de locação.

Figura B1 – Elementos em Planta de um Trecho de Alinhamento Rodoviário



Fonte: Do autor (2020)

Os pontos de concordância matemática incluem:

- Ponto de Curva (PC): início da curva horizontal.
- Ponto de Tangência (PT): término da curva horizontal.
- Ponto de Interseção (PI): ponto onde as tangentes se cruzam.

O desenvolvimento (D) é obtido a partir do ângulo central (AC) e do raio horizontal (R), grandezas usadas também para o cálculo da tangente interna

(PONTES FILHO, 1998). A tangente externa (TE) suaviza o traçado e permite uma transição segura entre curvas principalmente de concavidades opostas, também ditas reversas, tal como a curva em sequência se apresenta.

O raio horizontal circular mínimo (R_{cmin}) é função da estabilidade em curva e visibilidade. Depende da inclinação transversal do pavimento (superelevação), da velocidade veicular e do coeficiente de atrito transversal, tal como mostrado na Equação B1.

$$f_t \times g + g \times e = \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = R_c = \frac{v^2}{f_t \times g + g \times e}$$

$$R_c = \frac{v^2}{g \times (f_t + e)}; g = 9,81 m/s^2 \equiv \frac{1000}{\left(\frac{1}{3600}\right)^2} = 127.137,6 km/h^2$$

$$\frac{R_c}{1000} = \frac{v^2}{127.137,6 \times (f_t + e)} \tag{B1}$$

$$R_c = \frac{v^2}{127 \times (f_t + e)}$$

$$R_{c \min} = \frac{v^2}{127 \times (f_{t \max} + e_{\max})}$$

Em que:

R_{cmin} : raio mínimo de concordância horizontal (m)

V: velocidade de projeto (km/h)

f_{tmax} : coeficiente de atrito transversal máximo

e_{max} : superelevação máxima (m/m)

A superelevação rodoviária máxima é de 12% e o coeficiente de atrito transversal máximo é de 0,16 (AASHTO, 2018), para baixa velocidade de projeto.

APÊNDICE C – ESTIMATIVAS DE DECLIVIDADE TRANSVERSAL COM O *BALL-BANK*

Para determinar a velocidade e o coeficiente de atrito lateral, pode-se usar o Indicador de Inclinação Lateral (*Ball-Bank*), como ilustrado na Figura C1.

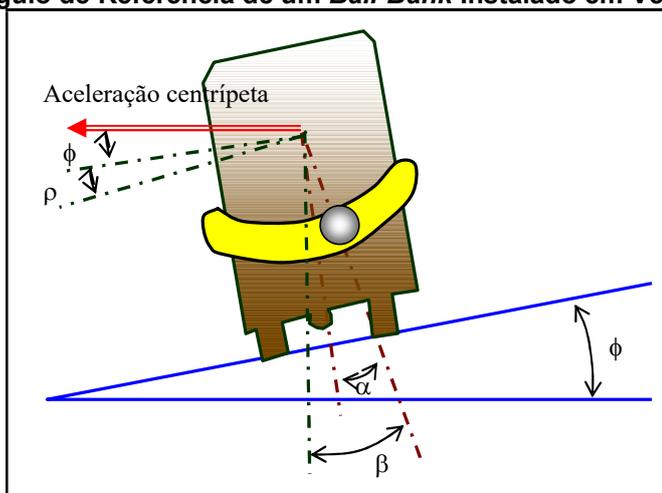
Figura C1 – Exemplo de Indicador de Inclinação Lateral (*Ball-Bank*)



Fonte: Boeing Distribution⁵

Após instalar o *Ball-Bank* no veículo, a curva é avaliada em várias etapas com velocidades crescentes. Os ângulos e velocidades são registrados tal como mostrado na Figura C2. Esses ângulos estão associados à aceleração centrípeta pela Equação C1, válida para qualquer sistema coerente de unidades.

Figura C2 – Ângulo de Referência de um *Ball-Bank* Instalado em Veículo Rodoviário



Fonte: AASHTO (2001). Adaptado: Autor.

⁵ Boeing Distribution, disponível em: <<https://shop.boeing.com/aviation-supply/p/1040=3F>>. Acesso em: fev 1º, 2.023

$$g \times e + g \times f_t = \frac{v^2}{r} \Rightarrow g \times \operatorname{tg}(\phi) + g \times \operatorname{tg}(\rho) = \frac{v^2}{r}$$

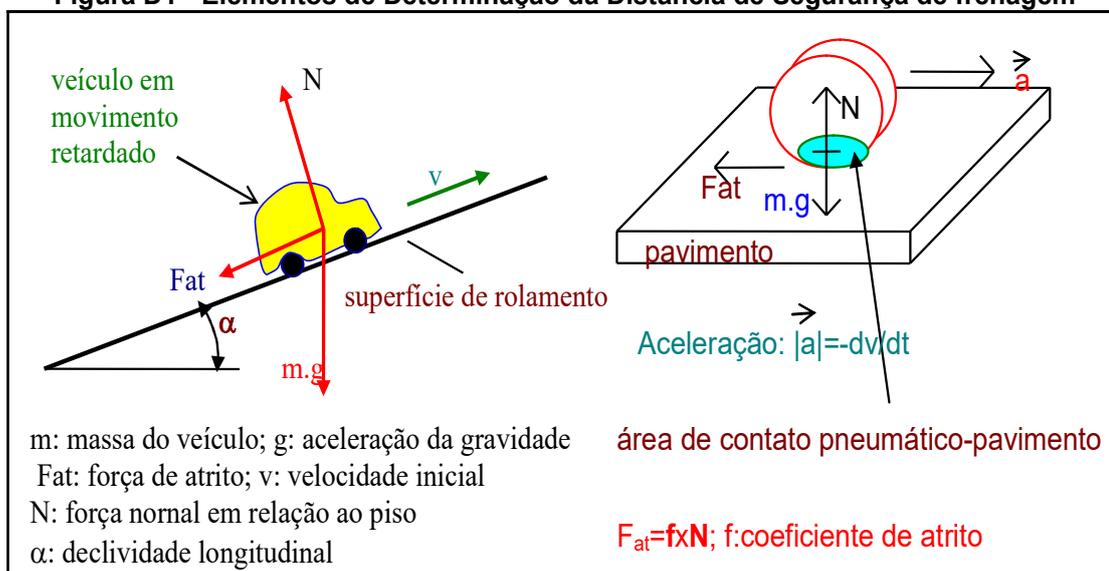
$$\rho = \operatorname{arc.tg}\left(\frac{v^2}{g \times r} - \operatorname{tg}(\phi)\right)$$

(C1)

APÊNDICE D – DISTÂNCIA DE SEGURANÇA DE FRENAGEM

Para calcular a distância de segurança de frenagem considera-se o movimento uniformemente retardado em rampa, tal como indicado na Figura D1. A Equação D1 apresenta a formulação clássica da distância de segurança de frenagem, que inclui o coeficiente de atrito longitudinal, cujos valores variam para pisos secos ou molhados e diminuem com a velocidade.

Figura D1 - Elementos de Determinação da Distância de Segurança de frenagem



Fonte: Do Autor (2023)

Greibe⁶ (2007) cita pesquisas da Administração Nacional de Segurança no Tráfego de Autoestradas (NHTSA) (2003) quanto à relevância de diversos parâmetros para se estimar a distância de segurança de frenagem. Na Figura D2 ilustra-se elementos influentes no contato entre pneu-pavimento. A Equação D2 apresenta as duas parcelas do cálculo desta distância correspondentes à distância de percepção e reação e a distância de efetiva frenagem, respectivamente.

⁶ GREIBE, Poul. **Braking distance, friction and behaviour Findings, analyses and recommendations based on braking trials**. Lyngby/DINAMARCA (2007). Trafitec Scion-DTU. Disponível em: <<https://www.trafitec.dk/sites/default/files/publications/braking%20distance%20-%20friction%20and%20driver%20behaviour.pdf>>. Acesso em fev 2, 2023

$$Fat + m.g.\text{sen}(\alpha) = m.\bar{a}$$

$$f.N + m.g.\text{sen}(\alpha) = mf$$

$$\{f[m.g.\cos(\alpha)] + m.g.[\text{sen}(\alpha)] = m.a\} \div [m.\cos(\alpha)]$$

$$f.g + g.\tan g(\alpha) = a / \cos(\alpha)$$

$$\text{mas : } \alpha \leq 10^0 \text{ (geralmente)} \Rightarrow \cos(\alpha) \cong 1$$

$$f.g + g.i = a; i = \tan g(\alpha)$$

$$f.g + g.i = \frac{v^2}{2.d_2}$$

$$d_2 = \frac{v^2}{2.g(f+i)}$$

$$d_2 = \frac{v^2}{2.g(f+i)}; c/g = 9,81. \frac{1}{1000. \left(\frac{1}{3600^2} \right)} = 127138 \text{ km/h}^2 \quad (\text{D1})$$

$$d_2 = \frac{1000.v^2}{2.127138(f+i)}$$

$$d_2 = 0,0039 \frac{v_d^2}{f+i}$$

Em que:

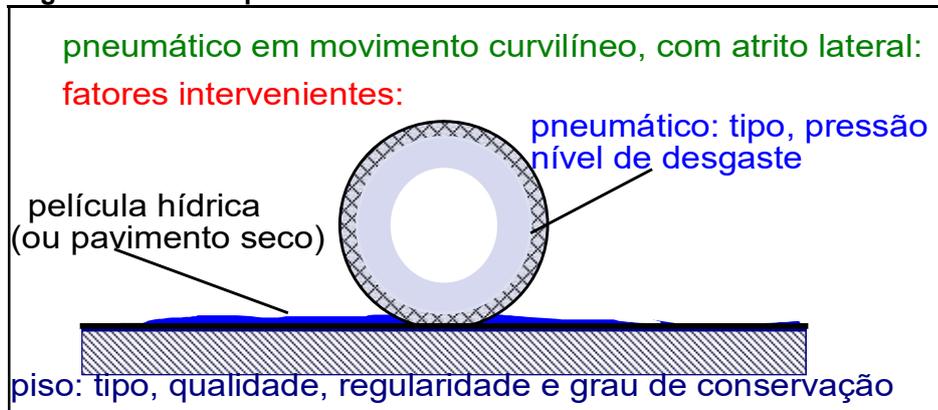
d2: distância de frenagem efetiva do veículo (m)

vd: velocidade diretriz (km/h)

f: coeficiente de atrito longitudinal entre pneumático e pavimento

i: declividade longitudinal da rampa (m/m)

Figura D2 – Principais Fatores Influentes no Coeficiente de Atrito Lateral



Fonte: Do autor (2020)

$$D_F = 0,69 \times v + 0,0039 \times \frac{v^2}{f + i} \quad (D2)$$

Em que:

D_F : distância de visibilidade de frenagem (m)

v : Velocidade (km/h)

f : coeficiente de atrito longitudinal pavimento-pneumático

i : Declividade longitudinal da rampa (m/m)

APÊNDICE E – VISIBILIDADE EM CURVAS HORIZONTAIS

Estima-se a extensão visível à frente do motorista quando da análise da visibilidade em curvas horizontais, de acordo com a flecha (M) do campo visual, tal como a Figura E1 apresenta, e expressa na Equação E1. A Figura E1, apresentada por FWA (2006), ilustra o campo visível.

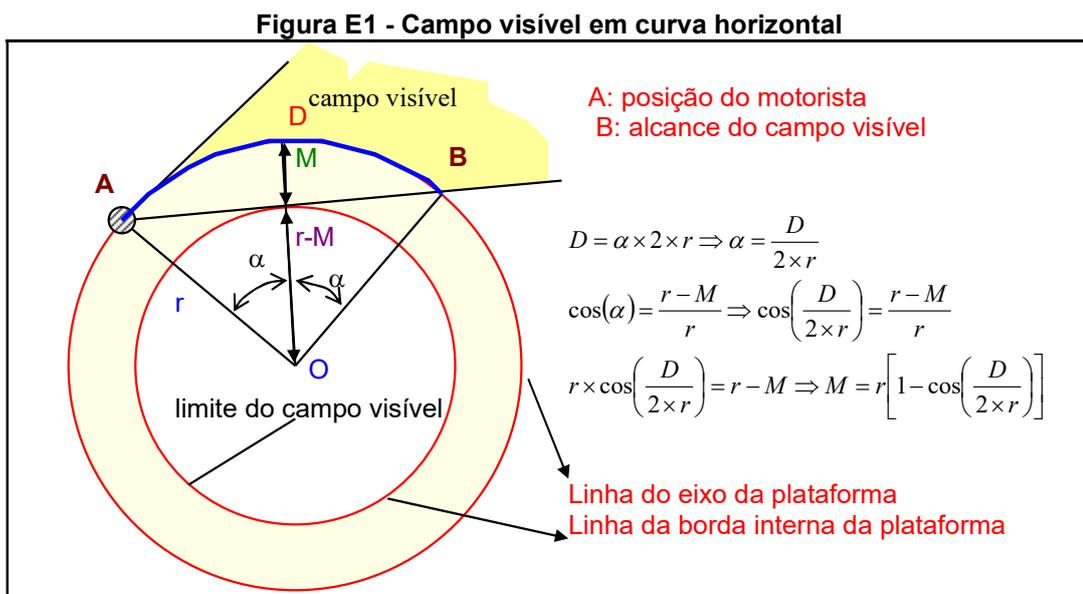
$$M_{\min} = R_c \times \left[1 - \cos\left(\frac{D_F}{2 \times R_c}\right) \right] \quad (\text{E1})$$

Em que:

M_{\min} : distância mínima de campo visível transversal ao eixo (m)

D_F : distância de frenagem (m)

R_c : raio de concordância Horizontal (m)

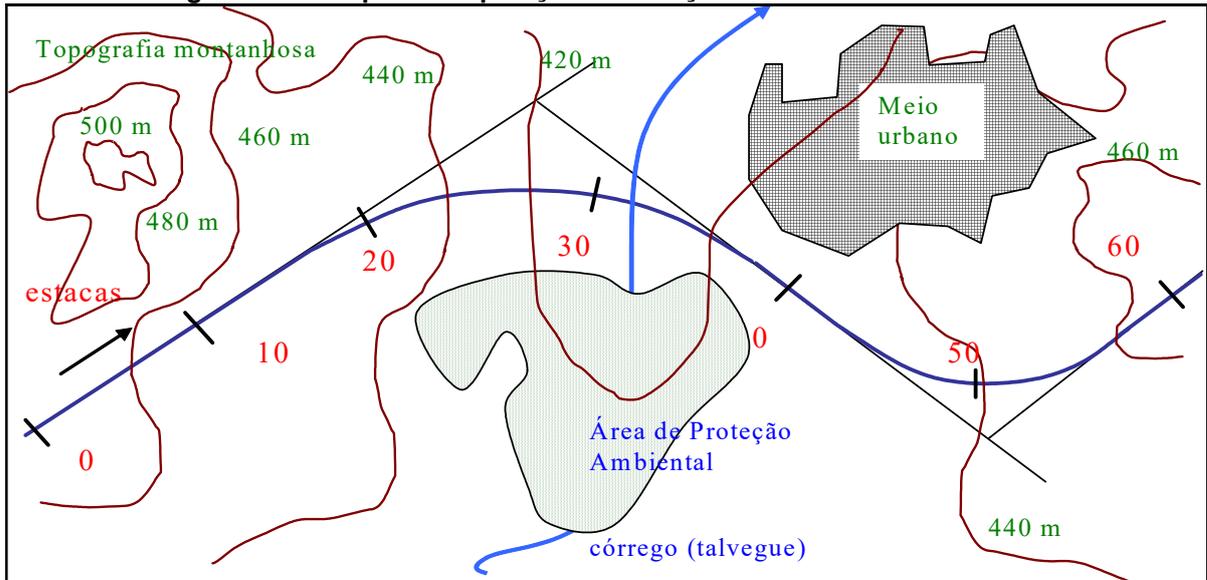


Fonte: Do Autor (2020)

APÊNDICE F – PERFIL LONGITUDINAL DE RODOVIAS

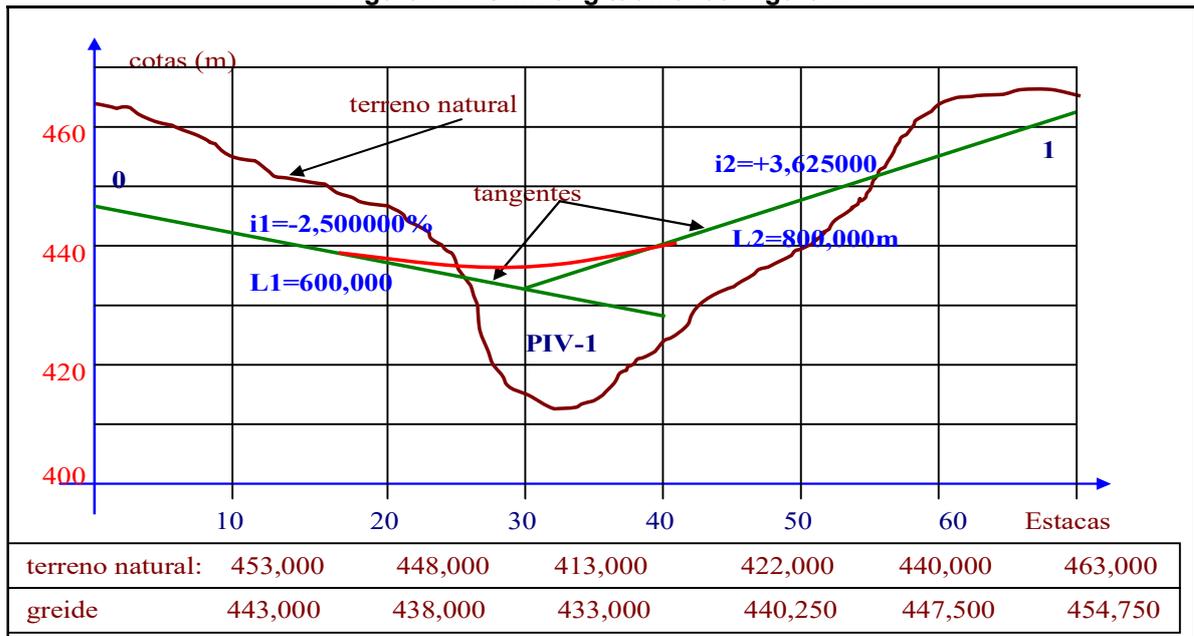
O perfil longitudinal de rodovias é um desenho da via que depende do traçado em planta, considerando o eixo e a topografia. A Figura F1 exemplifica um traçado em planta e o correspondente perfil longitudinal é mostrado na Figura F2.

Figura F1 Exemplo de Imposições ao Traçado Horizontal de Rodovias



Fonte: do autor (2020)

Figura F2 Perfil longitudinal da Figura E1

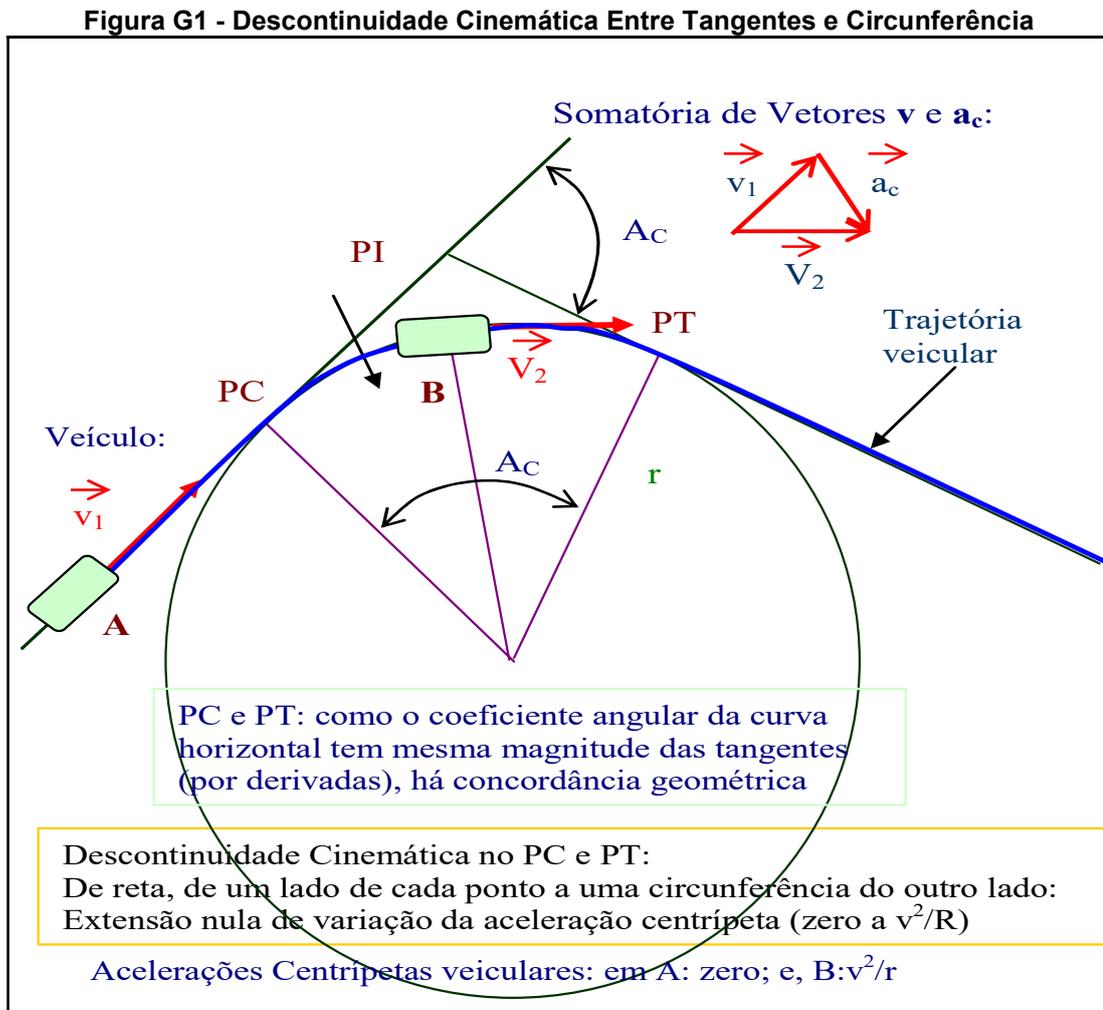


Fonte:Do autor (2020)

Há tendência de aumento excessivo de velocidade veicular quando os segmentos retilíneos verticais apresentam elevada declividade, em função da parcela da força-peso na direção do deslocamento. O acionamento dos freios de forma contínua ou em uso frequente, mesmo descontinuado, está correlacionado ao superaquecimento em função de *fading*, fadiga térmica, gerando ineficiência (Brossi, 2002, p. 27). Quando um veículo nestas condições atinge uma curva horizontal de raio reduzido, soma-se à esta força de frenagem a força centrípeta, limitada pelo coeficiente de atrito transversal, cenário típico de ocorrência de sinistros de elevada gravidade.

APÊNDICE G – A CURVATURA VARIÁVEL EM CURVAS HORIZONTAIS

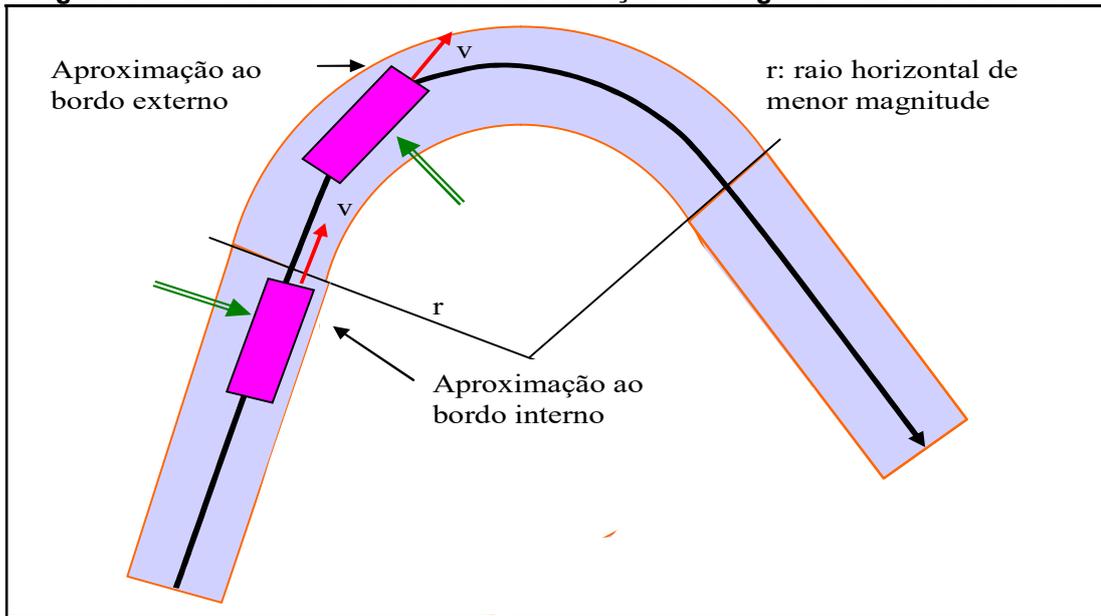
A transição entre tangente e curva horizontal circular causa descontinuidade cinemática, tal como mostrado na Figura G1.



Fonte: Do Autor (2022)

Motoristas iniciam o giro do volante antes do ponto de transição inicial (PC) e completam o giro após este ponto, resultando no deslocamento lateral ilustrado na Figura G2.

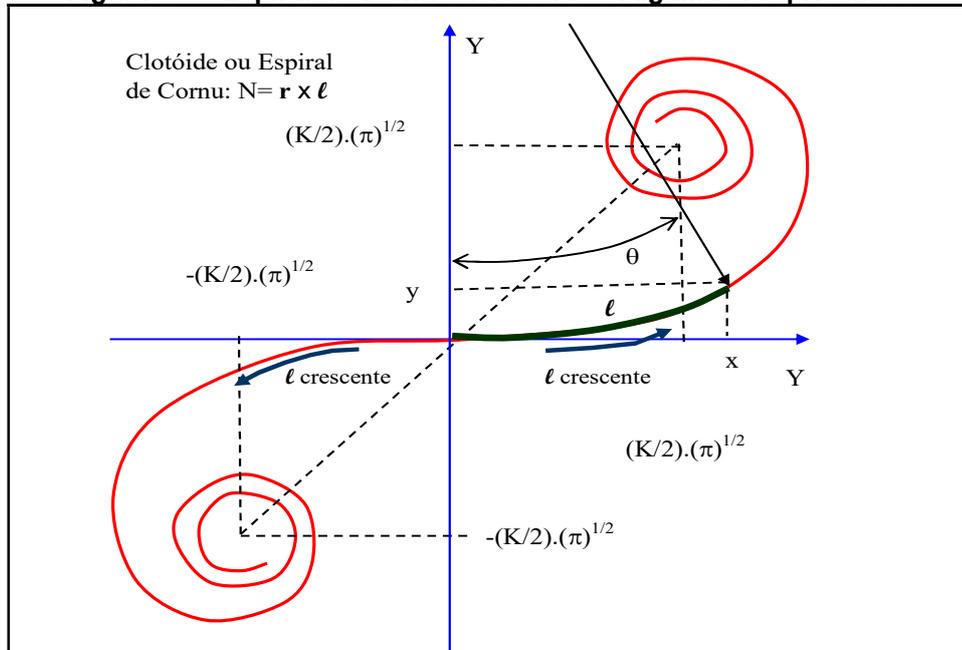
Figura G2 – Deslocamento Veicular em Transição de Tangente com Curva Circular



Fonte: Do Autor (2023)

Para uma transição suave entre tangente e circunferência, devem ser inseridas curvas de raio variável, tal como a Espiral de Cornu (Clotóide), cuja geometria é mostrada na Figura G3.

Figura G3 – Espiral de Cornu ou Clotóide e Algumas Propriedades



Fonte: Pimenta e Oliveira (2004), adaptação do Autor.

A Equação G1, válida para qualquer sistema coerente de unidades, correlaciona o comprimento total de uma espiral (L_s) com velocidade, raio circular e taxa de variação da aceleração, de acordo com as propriedades matemáticas da Espiral de Cornu.

$$J = \frac{d}{dt}(a_c); a_c = \left| \bar{a}_n \right| = \frac{v^2}{R}$$

$$J = \frac{d}{dt} \left(\frac{v^2}{r} \right) = \frac{d}{dr} \left(\frac{v^2}{r} \right) \times \frac{dr}{dt}$$

Aplicando-se derivada de função implícita $[u; v]: (u \times v)' = u' \times v + v' \times u$:

$$J = \left[0 \times r^{-1} + (-r^{-2}) \times v^2 \right] \times \frac{dr}{dt} = -\frac{v^2}{r^2} \times \frac{dr}{dt}$$

$$J = -\frac{v^2}{r^2} \times \frac{dr}{dl} \times \frac{dl}{dt} = -\frac{v^2}{r^2} \times \frac{dr}{dl} \times v; v = \frac{dl}{dt}$$

$$J = -\frac{v^2}{r^2} \times \frac{d}{dl} \left(\frac{N}{l} \right) \times v; \text{com } r = \frac{N}{l}$$

$$J = -\frac{v^2}{r^2} \times \left[0 \times l^{-1} + (-l^{-2}) \times N \right] \times v$$

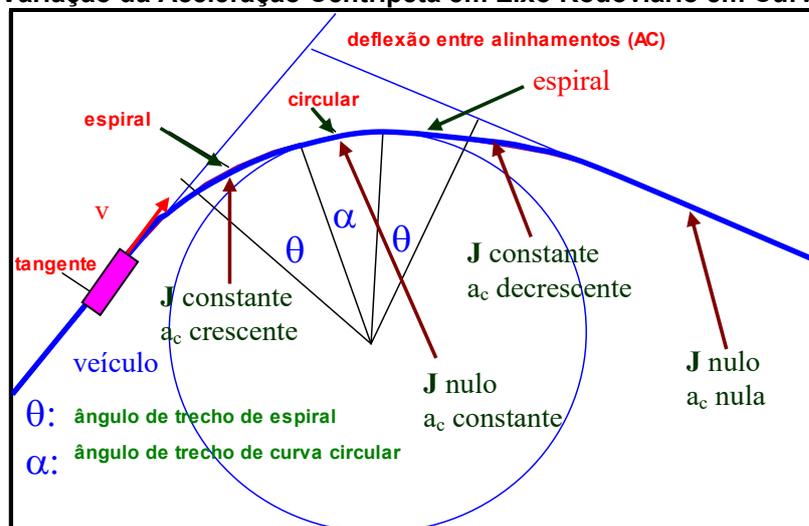
$$J = \left(-\frac{v^2}{r^2} \right) \times \left(-\frac{N}{l^2} \right) \times v = \frac{v^3}{r^2} \times \frac{N}{l^2} = \frac{v^3 \times r \times l}{r^2 \times l^2}$$

$$J = \frac{v^3}{r \times l}$$

(G1)

A variação da aceleração centrípeta é ilustrada na Figura G3.

Figura G3 – Variação da Aceleração Centrípeta em Eixo Rodoviário em Curva com Espiral



Do Autor (2023).

APÊNDICE H – AVALIAÇÃO DO EXCESSO DE VELOCIDADE POR ULTRAPASSAGEM

Método

Localização dos Levantamentos: rodovias de pista única, operadas com mão dupla e rodovias de pista dupla, operadas com mão única, nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

Condições e Premissas

1. Veículos que ultrapassam o carro de pesquisa trafegam acima da velocidade permitida.
2. Os veículos que saem para o acostamento ou que estão parados na via são desconsiderados.
3. Ultrapassagem agressiva: quando os faróis do veículo que insiste em ultrapassar praticamente “somem” do retrovisor do carro de pesquisa.
4. Auxílio a ultrapassagens: se necessário, o veículo de pesquisa desloca-se para o acostamento.
5. Exclusões: motocicletas e veículos de menos de 4 rodas.
6. Aceitabilidade de variação máxima de velocidade: o carro de pesquisa pode apresentar variação de velocidade em relação à constante estabelecida para o trecho em até 10 km/h; em caso contrário, o levantamento será desconsiderado.
7. Leitura de velocidade: exclusivamente pelo velocímetro do carro de pesquisa.

Levantamentos:

Na Tabela H1, referente ao ano de 2016, foram utilizadas as seguintes siglas: U1 ultrapassagem normal; U2 ultrapassagem agressiva; P1: veículo foi ultrapassado pelo de pesquisa, sem dificuldade e P2: veículo ultrapassado pelo veículo de pesquisa com alguma dificuldade.

No ano de 2017, a análise foi aperfeiçoada, resultando nas siglas para os as tabelas de H2 a H8: U1 ultrapassagem em linha seccionada branca para carro; U2 ultrapassagem em linha seccionada branca para caminhão e ônibus; G1 ultrapassagem cruzando linha dupla amarela para carro; G2 ultrapassagem

cruzando linha dupla amarela para caminhão e ônibus e P veículo ultrapassado pelo veículo de pesquisa com alguma dificuldade.

Tabela H1 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – BR 101 – Angra dos Reis

Rodovia: BR 101 Rio Santos		Velocidade: 40 km/h					
		km inicial:	480	U1	U2	P1	P2
		km final:	487				
trecho:	Angra dos Reis RJ			0	0	0	veículos
data:	8/7/2016		100	0	0	0	% veicular
horário:	17:00 às 17:10	Total veículos: 159					

Do Autor (2023)

Tabela H2 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – BR 101 – Mangaratiba – 1ª Tomada

primeiro levantamento:

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

Rodovia: BR 101 Rio Santos		Velocidade: 40 km/h						
		km inicial:	445	U1	U2	G1	G2	P
		km final:	498					
trecho:	Mangaratiba RJ		23	0	27	0	0	veículos
data:	25/7/2017		46	0	54	0	0	% veicular
horário:	08:35 às 09:40	Total veículos: 50						

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

Rodovia: BR 101 Rio Santos		velocidade: 50 km/h						
		km inicial:	445	U1	U2	G1	G2	P
		km final:	498					
trecho:	Mangaratiba RJ		3	0	8	0	0	veículos
data:	25/7/2017		27	0	73	0	0	% veicular
horário:	08:35 às 09:40	Total veículos: 11						

Do Autor (2023)

Tabela H3 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – BR 101 – Mangaratiba – 2ª tomada

primeiro levantamento:

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

Rodovia: BR 101 Rio Santos		Velocidade: 60 km/h						
		km inicial:	445	U1	U2	G1	G2	P
		km final:	498					
trecho:	Mangaratiba RJ		7	1	1	0	1	veículos
data:	25/7/2017		70	10	10	0	10	% veicular
horário:	08:35 às 09:40	Total veículos: 10						

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

Rodovia: BR 101 Rio Santos		Velocidade: 80 km/h						
		km inicial:	445	U1	U2	G1	G2	P
		km final:	498					
trecho:	Mangaratiba RJ		1	0	0	0	1	veículos
data:	25/7/2017		50	0	0	0	50	% veicular
horário:	08:35 às 09:40	Total veículos: 2						

Do Autor (2023)

Tabela H4 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – SP 125

segundo levantamento:

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

		Velocidade: 40 km/h					
Rodovia: SP 125	km						
Oswaldo Cruz	inicial:	25	U1	U2	G1	G2	P
	km final:	31					
trecho:	S L Paraitinga	SP	3	0	0	0	0 veículos
data:	26/7/2017		100	0	0	0	0 % veicular
horário:	08:17	às	08:30	Total veículos: 3			

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

		Velocidade: 60 km/h					
Rodovia: SP 125	km						
Oswaldo Cruz	inicial:	25	U1	U2	G1	G2	P
	km final:	31					
trecho:	S L Paraitinga	SP	7	0	0	0	0 veículos
data:	26/7/2017		100	0	0	0	0 % veicular
horário:	08:17	às	08:30	Total veículos: 7			

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

		Velocidade: 80 km/h					
Rodovia: SP 125	km						
Oswaldo Cruz	inicial:	25	U1	U2	G1	G2	P
	km final:	31					
trecho:	S L Paraitinga	SP	3	0	0	0	0 veículos
data:	26/7/2017		100	0	0	0	0 % veicular
horário:	08:17	às	08:30	Total veículos: 3			

Do Autor (2023)

Tabela H5 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – BR 116 - Caçapava

terceiro levantamento:

PISTA DUPLA

		Velocidade: 110 km/h					
Rodovia: BR 116	km						
Via Dutra	inicial:	128	U1	U2	G1	G2	P
	km final:	145					
trecho:	Caçapava	SP	0	0	0	0	13 veículos
data:	26/7/2017		0	0	0	0	100 % veicular
horário:	09:03	às	09:14	Total veículos: 13			

quarto levantamento:

PISTA DUPLA

		Velocidade: 110 km/h					
Rodovia: SP 65	km						
V D Pedro I	inicial:	7	U1	U2	G1	G2	P
	km final:	73					
trecho:	Igaratá/outros	SP	4	0	0	0	59 veículos
data:	26/7/2017		6	0	0	0	94 % veicular
horário:	09:46	às	10:25	Total veículos: 13			

Do Autor (2023)

Tabela H6 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – SP 65 - Igaratá

quarto levantamento:

PISTA DUPLA

Rodovia: SP 65 V D Pedro I		Velocidade: 100 km/h						
km inicial: 7		U1	U2	G1	G2	P		
km final: 73								
trecho:	Igaratá/outros	SP	3	0	0	0	3	veículos
data:	26/7/2017		50	0	0	0	50	% veicular
horário:	09:46	às	10:25	Total veículos: 6				

Do Autor (2023)

Tabela H7 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – BR 101 - Bertioga

quinto levantamento:

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

Rodovia: BR 101 Rio Santos		Velocidade: 40 km/h						
km inicial: 213		U1	U2	G1	G2	P		
km final: (final)								
trecho:	Bertioga	SP	13	4	0	0	0	veículos
data:	4/8/2017		76	24	0	0	0	% veicular
horário:	06:50	às	07:32	Total veículos: 17				

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

Rodovia: BR 101 Rio Santos		Velocidade: 60 km/h						
km inicial: 213		U1	U2	G1	G2	P		
km final: (final)								
trecho:	Bertioga	SP	2	0	3	1	0	veículos
data:	4/8/2017		33	0	50	17	0	% veicular
horário:	06:50	às	07:32	Total veículos: 6				

PISTA ÚNICA MÃO DUPLA

Rodovia: BR 101 Rio Santos		Velocidade: 80 km/h						
km inicial: 213		U1	U2	G1	G2	P		
km final: (final)								
trecho:	Bertioga	SP	1	0	0	0	0	veículos
data:	4/8/2017		100	0	0	0	0	% veicular
horário:	06:50	às	07:32	Total veículos: 1				

Do Autor (2023)

Tabela H8 Ultrapassagens de Verificação de Excesso de Velocidade – SP 160 - Cubatão

sexto levantamento:

PISTA DUPLA

		Velocidade: 80 km/h						
Rodovia: SP 160		km inicial: (serra)	U1	U2	G1	G2	P	
Imigrantes		km final: (serra)						
trecho:	Igaratá/outros	SP	3	4	0	0	1	veículos
data:	4/8/2017		38	50	0	0	13	% veicular
horário:	08:00	às	08:09	Total veículos: 8				

PISTA DUPLA

		Velocidade: 100 km/h						
Rodovia: SP 160		km inicial: (serra)	U1	U2	G1	G2	P	
Imigrantes		km final: (serra)						
trecho:	Igaratá/outros	SP	4	4	0	0	38	veículos
data:	4/8/2017		9	9	0	0	83	% veicular
horário:	(impreciso)	às	(impreciso)	Total veículos: 46				

Do Autor (2023)

Na Tabela H9, apresenta-se os totais de veículos pesquisados em pista única de mão dupla, em 2017, sob mesma classificação e critério de cômputo, indicando a percentagem de veículos que ultrapassaram o veículo da pesquisa, em linha dupla amarela: quase 40% dos veículos sujeitos a duas infrações de caráter grave a gravíssimo.

Tabela H9 Totais de Veículos Pesquisados em Pistas Únicas de Mão Dupla

total de veículos pesquisados em julho e agosto/17 PISTA ÚNICA MÃO DUPLA:	110
total de veículos pesquisados em julho e agosto/17 que ultrapassaram por linha dupla	40
contínua:	
Porcentagem de veículos ultrapassando em linha dupla amarela:	36

Do Autor (2023)

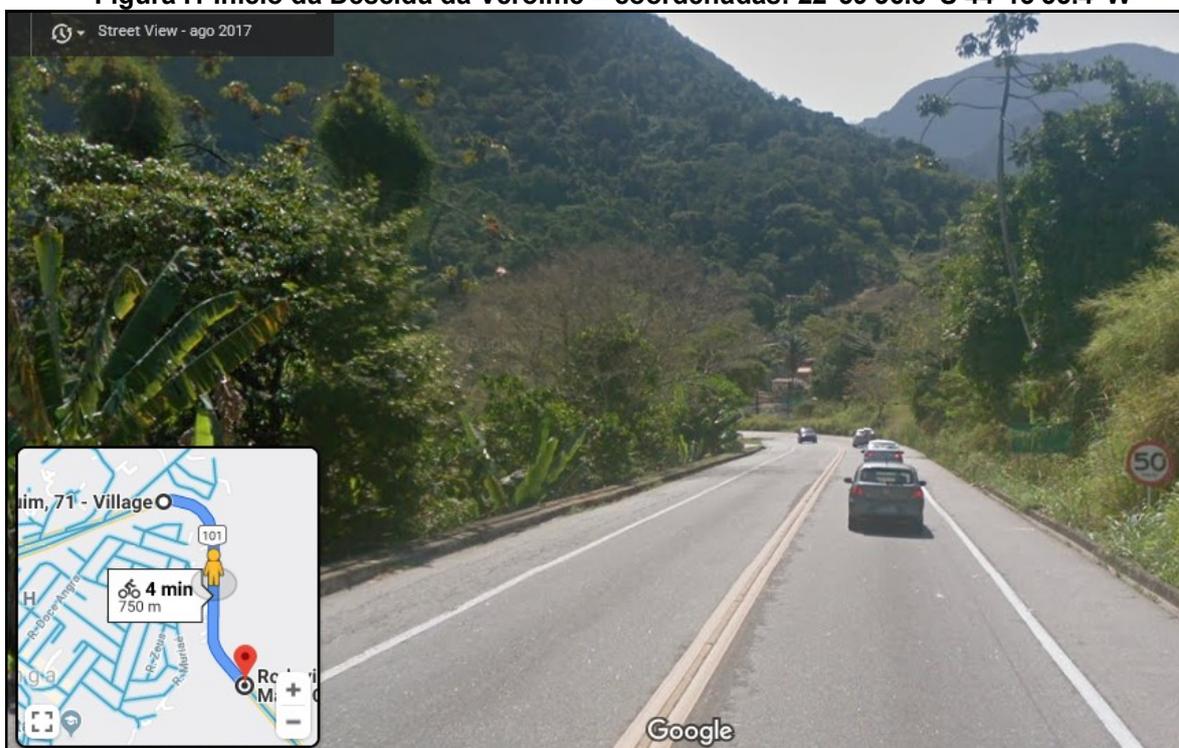
APÊNDICE I – AVALIAÇÃO DE REPIQUE DE VELOCIDADE EM RADARES

Em 28 de janeiro de 2019, foram feitas tomadas de tempo de percurso de amostras de veículos na BR 101, no município de Angra dos Reis, Estado do Rio de Janeiro, no sentido de tráfego do Rio de Janeiro a Paraty, visando levantar médias de velocidades em pontos anterior, próximo ao radar e posterior a este, avaliando o “repique de velocidade”, que corresponde à frenagem anterior ao radar observado e posterior aceleração. O trecho selecionado está entre os quilômetros 473 ao 475 da BR 101.

Descrição do procedimento: foram tomadas 7 amostras de velocidade em 28/1/2019, sendo as 3 últimas geradoras de informações de possível repique de velocidade.

No trecho da Descida da Verolme, antes de se atingir Jacuecanga, de acordo com a Figura I1, capturada do carro de pesquisa; lê-se a velocidade permitida de 50 km/h, em segmento de descida, com curva acentuada à frente. A velocidade permitida no quinto e no sexto pontos de medição, este último o do radar, é de 50 km/h. A velocidade permitida no sétimo ponto é de 60 km/h.

Figura I1 Início da Descida da Verolme – coordenadas: 22°59'36.8"S 44°13'53.4"W



Fonte: Google Street (2019)

Na Tabela I1, apresenta-se as velocidades estimadas pelas medições de tempo de percurso, apenas para automóveis. As velocidades estimadas são as médias e máximas de cada grupo de amostras. A média das velocidades médias da 1ª à 5ª tomadas é 73 km/h, **18%** maior que a média das velocidades permitidas, que é igual a 62 km/h. A média das máximas velocidades, da 1ª à 5ª, é de 101 km/h, **63%** maior que a média das permitidas. A média no ponto do radar, penúltimo ponto levantado, é de 29 km/h e máxima de 41 km/h, onde o limite é 50 km/h, indicando forte redução de velocidades em relação aos pontos próximos, dado que a média no quinto ponto é 88 km/h e no sétimo ponto 64 km/h. Estas magnitudes de velocidade permitem concluir que há repique de velocidade na frota. O excesso de velocidade segundo a média das médias, 18%, é superior ao limite de aceitabilidade, 7% pelo CONTRAN, indicando que, caso fossem aplicadas ações infracionais, deveria acarretar elevado percentual de veículos multados em relação à frota. A Figura I2 apresenta o local do radar, junto ao penúltimo ponto de tomada de tempos.

Tabela I1 Medições de Tempo e Velocidades – BR 101 – Angra dos Reis/RJ

P. T.	V.P. (km/h)	Dist. (m)	vel. (km/h):			tempo (s)		Tomadas de Tempo de Percurso de Automóveis (s):															
			média	(%)	máxima	médio	mín.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	1	1	1		
1	60	100	56	-7	86	6,4	4,2	4,2	8,3	7,8	5,7	7,2	5,4	6,3	5,6	7,5	6,3	5,5	7,5	5,5	7,5	5,5	7,5
2	80	93	82	3	98	4,1	3,4	4,9	5,4	3,9	3,7	3,6	4,4	3,4	3,7	4,3	3,4	3,9	4,3	3,9	4,3	3,9	4,3
3	60	96	73	22	108	4,7	3,2	6,3	3,2	5,2	5,7	4,2	4,7	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
4	60	100	63	5	92	5,7	3,9	4,8	5,6	7,5	5,3	6,8	5,6	5,1	6,7	5,7	6,9	5,9	6,6	5,6	6,6	5,6	6,6
5	50	100	88	76	120	4,1	3,0	3,7	4,4	4,6	5,0	4,1	3,2	3,4	3,9	5,9	3,0	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
6	50	100	29	41	36	12,2	9,9	12,3	14,1	11,5	12,1	12,7	9,9	13,1	9,9	13,1	9,9	13,1	9,9	13,1	9,9	13,1	9,9
7	60	100	64	7	103	5,6	3,5	5,3	3,5	4,1	8,5	4,2	6,8	5,2	6,5	5,5	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3

Do Autor (2023)

As velocidades Médias e Máximas de caminhões, ônibus e motocicletas estão presentes nas Tabelas I2, I3 e I4, respectivamente.

A estratégia efetivada das medições de velocidade efetuadas neste segmento, inclui levantamento de tempos ao longo da mesma rodovia, do tipo pista única, em fluxo livre. Quando se aproximavam veículos que estavam próximos, em aparente distância equivalente a menos que 2 s, apenas se anotava o tempo do veículo dianteiro.

Figura I2 Local da 6ª tomada de velocidades, ao lado do Radar



Fonte: Google Street (2019)

Tabela I2 Tomadas de Tempo, Velocidades Médias e Máximas de Caminhões

CAMINHÕES		tempo	tempo								
vel. Med (km)	vel. Max (km)	médio (s)	mínimo (s)	1	2	3	4	5	6	7	8
50	63	7,2	5,7	5,7	6,5	8,9	7	9	6,3	6,8	7,4
69	71	4,8	4,7	5	4,7	4,8					
51	74	6,8	4,7	4,7	8,9						
106	116	3,4	3,1	3,7	3,1						
25	25	14,2	14,2	14,2							
60	61	6,0	5,9	5,9	6,1						

Do Autor (2023)

Tabela I3 Tomadas de Tempo, Velocidades Médias e Máximas de Ônibus.

ÔNIBUS		tempo	tempo						
vel. Med (km)	vel. Max (km)	médio (s)	mínimo (s)	1	2	3	4	5	6
88	88	3,8	3,8	3,8					
55	89	6,3	3,9	11	6,4	5,5	5,8	4,9	3,9
103	113	3,5	3,2	3,6	3,7	3,2			
36	36	9,9	9,9	9,9					

Do Autor (2023)

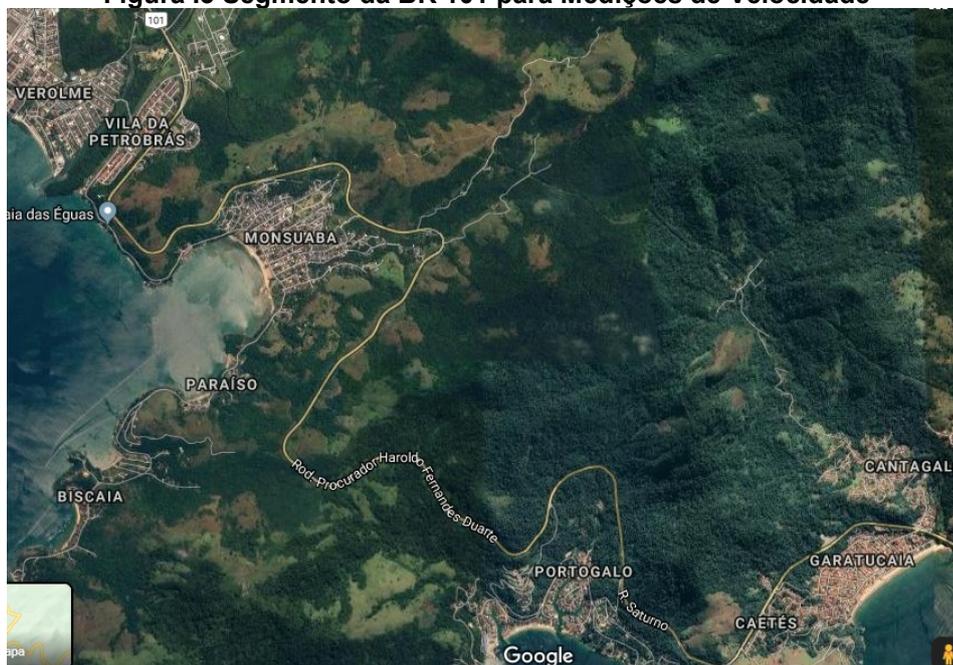
Tabela 14 Tomadas de Tempo, Velocidades Médias e Máximas de Motocicletas.

MOTOCICLETAS		tempo	tempo	
vel. Med (km)	vel. Max (km)	médio (s)	mínimo (s)	1
64	64	5,6	5,6	5,6
84	84	4,0	4,0	4
54	54	6,4	6,4	6,4

Do Autor (2023)

No dia do levantamento, o pavimento estava seco e havia poucos trechos com nível de serviço elevado. Não havia nenhum veículo aparente de fiscalização nem policial rodoviário visível ao longo de todo o trecho, fato que se entendeu que poderia influenciar nas medições. Na Figura 13, apresenta-se o segmento pleno de medições, ao longo da BR 101 no município de Angra dos Reis/RJ. Na Figura 14, apresenta-se o trecho das 3 últimas tomadas de tempo: anterior ao radar (antepenúltima), no radar (penúltima) e após o radar (última).

Figura 13 Segmento da BR 101 para Medições de Velocidade



Fonte: Google Street (2019)

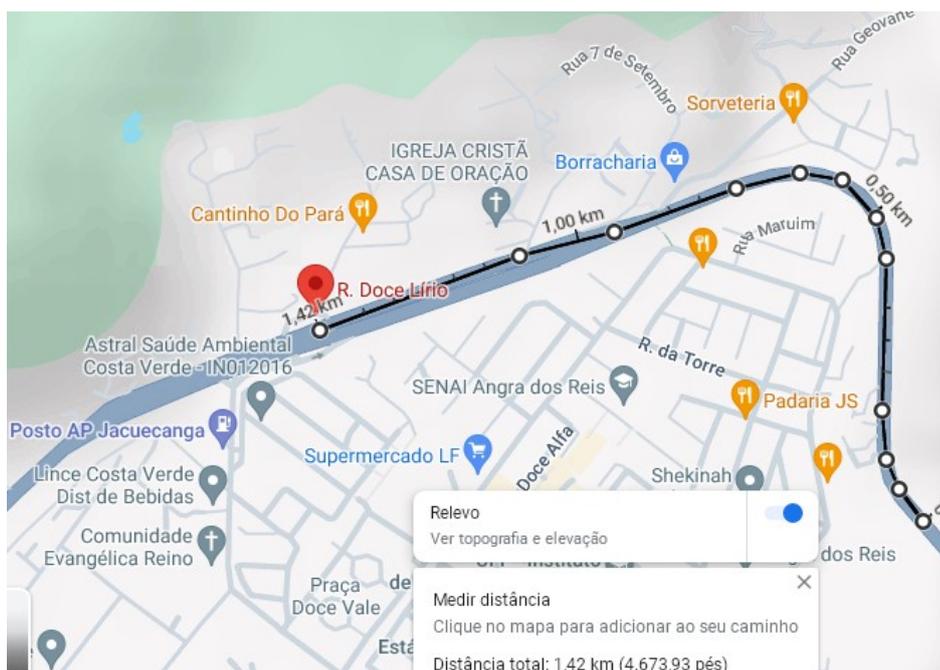
Figura I4 Trecho da BR 101 das 3 últimas Medições de Velocidade



Fonte: Google Street (2019)

As medições foram encerradas no sétimo ponto, no quilômetro 476 da BR 101. A Figura I5 apresenta a distância entre o quinto e o sétimo pontos, medidos no ambiente Google Maps: 1,42 km.

Figura I5 – Distância entre o quinto e o sétimo pontos



Fonte: Google Maps (2022)

APÊNDICE J – APLICAÇÃO DO MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA EM TRECHOS DA SP 98

Na Tabela J1, apresenta-se os elementos da geometria da SP 98 Rodovia Dom Paulo Rolim Loureiro, rodovia conhecida como “Mogi-Bertioga”, de plataforma de pista simples e mão dupla, entre os pontos situados entre os quilômetros 67+380 m e 78+925 m, relativos a planalto e serra. As referências em quilômetros dos pontos de início de curvas horizontais (PC) e de término de curvas horizontais (PT) foram estimadas, em face de ser um traçado simplificado para tangentes e curvas horizontais, de acordo com o modelo. Os PCs da primeira coluna indicam cada uma das curvas horizontais consideradas. A velocidade indicada na tabela é a permitida. O sentido do tráfego é o crescente da quilometragem, selecionado por se tratar da predominância de descida da Serra do Mar. O segmento em estudo tem seu ponto inicial em coordenadas UTM, presentes no desenho da via (correspondentes a N= 7.386.600 m e E= 384.675 m – SAD 69; Z23; latitude de $-23,627524^{\circ}$ e longitude de $-46,131010^{\circ}$).

Na Tabela J2, apresenta-se os elementos do trecho seguinte ao da Tabela J1, correspondentes à descida da Serra do Mar, entre os quilômetros 78+925 m e 93+152 m. A extensão dos dois trechos é de 25.772 m, estimada pelo *as built* e confirmada pelo modelo, após distribuição de erros de extensão.

Os ângulos centrais (ACs) foram obtidos com transferidor, sob leitura arredondada para grau inteiro; as extensões de tangentes precedentes às curvas (L) e os raios horizontais foram obtidos por leitura com escalímetro, arredondadas para metro. A amplitude dos valores máximos e mínimos dos dois trechos está apresentada na Tabela J3.

Nas Tabelas J4 e J5, apresenta-se os coeficientes de correlação entre os IRVs com o número de mortos e feridos nos trechos, para levantamentos de 2009 a 2018.

Tabela J1 - Elementos Geométricos e Valores de IRVs do Planalto da SP 98

km de cada								km do PC:				km do PT:				v: velocidade permitida				
PC de acordo								calculado pelos				calculado pelos				dados da tabela:				
com as Coord. Do desenho da rodovia								dados da tabela:				dados da tabela:				dados da tabela:				
AC	L	i	R	D	e	Lac	até PC:	Km calculado:		Km calculado:		v	IRV _{L6}	IRV _{CG}	IRV _L	IRV _C	(km cresc/decrec)			
PCi	(o)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)		km	m	km	m	(km/h)					mortos:	feridos:		
0								67	+	380,000			k=	100	100	0,1	100			
1	66	100	1,2	115	132,5	6,9	100,0	67	+	480,000	67	+	612,470	60	80	-7	22	18	0	10
2	99	130	-3,5	76	131,3	7,4	362,5	67	+	742,470	67	+	873,789	60	164	-7	46	30	1	17
3	31	78	-2,7	89	48,2	7,1	571,8	67	+	951,789	67	+	999,943	60	84	-7	23	25	0	14
4	55	150	-3,8	116	111,4	7,9	769,9	68	+	149,943	68	+	261,295	60	124	-8	34	16	0	9
5	14	132	-1,6	246	60,1	2,5	1.013,3	68	+	393,295	68	+	453,404	60	53	-2	15	9	0	9
6	31	320	3,1	83	44,9	6,9	1.393,4	68	+	773,404	68	+	818,311	40	348	-7	43	8	0	4
7	72	93	-3,5	72	90,5	8,6	1.531,3	68	+	911,311	69	+	1,789	60	122	-8	34	31	1	11
8	47	21	-4,0	158	129,6	3,2	1.642,8	69	+	22,789	69	+	152,397	60	13	-3	4	15	0	9
9	21	171	-5,3	238	87,2	5,4	1.943,4	69	+	323,397	69	+	410,629	60	72	-5	20	6	4	3
10	8	165	2,8	255	35,6	3,6	2.195,6	69	+	575,629	69	+	611,233	60	61	-4	17	7	0	9
11	14	35	-0,3	61	14,9	4,2	2.266,2	69	+	646,233	69	+	661,139	60	55	-4	15	42	0	0
12	31	31	-1,1	87	47,1	3,3	2.312,1	69	+	692,139	69	+	739,210	60	35	-3	10	29	0	14
13	28	285	1,5	140	68,4	5,4	2.644,2	70	+	24,210	70	+	92,627	60	190	-5	53	15	1	4
14	34	175	4,9	120	71,2	8,7	2.887,6	70	+	267,627	70	+	338,836	40	127	-9	16	2	0	0
15	18	44	4,7	126	39,6	6,2	3.002,8	70	+	382,836	70	+	422,421	60	31	-6	9	16	0	4
16	14	126	4,4	385	94,1	0,6	3.168,4	70	+	548,421	70	+	642,494	60	31	-1	9	7	0	18
17	57	206	-5,2	105	104,5	8,5	3.468,5	70	+	848,494	70	+	952,952	60	189	-8	52	18	1	12
18	64	48	-3,7	62	69,3	8,9	3.621,0	71	+	0,952	71	+	70,206	60	73	-9	20	37	0	0
19	26	89	-4,8	102	46,3	5,3	3.779,2	71	+	159,206	71	+	205,493	60	87	-5	24	22	0	1
20	23	74	-5,5	116	46,6	7,1	3.899,5	71	+	279,493	71	+	326,058	60	63	-7	17	17	0	3
21	39	81	-3,5	94	64,0	6,4	4.027,1	71	+	407,058	71	+	471,042	60	84	-6	23	24	0	22
22	41	164	0,0	88	63,0	7,9	4.255,0	71	+	635,042	71	+	698,013	60	172	-8	48	24	0	8
23	40	170	0,5	320	223,4	4,9	4.488,0	71	+	868,013	72	+	91,415	60	50	-5	14	4	0	16
24	18	328	1,6	267	83,9	3,2	5.039,4	72	+	419,415	72	+	503,296	60	117	-3	33	7	0	5
25	19	79	4,0	150	49,7	6,0	5.202,3	72	+	582,296	72	+	632,038	60	48	-6	13	13	1	28
26	35	134	3,6	110	67,2	9,2	5.386,0	72	+	766,038	72	+	833,233	60	107	-9	30	17	0	7
27	15	50	-2,1	111	29,1	-5,1	5.503,2	72	+	883,233	72	+	912,293	60	48	5	13	31	1	17
28	18	572	0,2	272	85,5	7,6	6.104,3	73	+	484,293	73	+	569,744	60	194	-8	54	3	1	6
29	78	64	-0,4	168	228,7	7,5	6.253,7	73	+	633,744	73	+	862,452	60	35	-7	10	9	1	10
30	13	118	1,9	270	61,3	5,4	6.600,5	73	+	980,452	74	+	41,713	60	41	-5	11	5	0	5
31	22	29	0,3	167	64,1	6,1	6.690,7	74	+	70,713	74	+	134,836	60	16	-6	5	11	0	2
32	15	57	5,4	284	74,4	4,6	6.811,8	74	+	191,836	74	+	266,187	60	18	-5	5	5	1	2
33	48	111	0,8	163	136,6	4,4	6.997,2	74	+	377,187	74	+	513,742	60	65	-4	18	13	0	5
34	36	226	0,3	210	131,9	6,7	7.359,7	74	+	739,742	74	+	871,689	60	100	-7	28	7	0	19
35	29	276	-2,5	148	74,9	7,4	7.767,7	75	+	147,689	75	+	222,598	60	177	-7	49	12	0	2
36	43	103	6,5	165	123,8	8,2	7.945,6	75	+	325,598	75	+	449,429	60	54	-8	15	9	1	41
37	82	116	3,8	90	128,8	4,7	8.185,4	75	+	565,429	75	+	694,235	60	118	-5	33	27	2	24
38	17	286	0,6	220	65,3	6,8	8.600,2	75	+	980,235	76	+	45,510	60	120	-7	33	6	2	9
39	96	69	-2,0	106	177,6	7,6	8.734,5	76	+	114,510	76	+	292,115	60	61	-8	17	19	2	9
40	45	105	-7,5	141	110,7	6,3	9.017,1	76	+	397,115	76	+	507,856	60	75	-6	21	14	0	1
41	27	105	-0,6	140	66,0	4,2	9.232,9	76	+	612,856	76	+	678,829	60	72	-4	20	16	0	19
42	11	467	1,5	680	130,6	2,5	9.765,8	77	+	145,829	77	+	276,380	60	66	-2	18	2	0	4
43	73	137	-2,7	146	186,0	6,5	10.033,4	77	+	413,380	77	+	599,397	40	90	-6	11	2	3	12
44	16	44	1,0	390	108,9	6,3	10.263,4	77	+	643,397	77	+	752,306	60	10	-6	3	1	3	116
45	76	139	4,0	87	115,4	8,6	10.511,3	77	+	891,306	78	+	6,707	60	140	-8	39	24	0	5
46	52	42	7,3	120	108,9	7,1	10.668,7	78	+	48,707	78	+	157,615	60	30	-7	8	17	0	2
47	5	63	5,4	185	16,1	0,8	10.840,6	78	+	220,615	78	+	236,760	60	32	-1	9	14	0	0
48	5	67	1,5	155	13,5	3,5	10.923,8	78	+	303,760	78	+	317,286	60	41	-3	11	15	0	1
49	30	110	-4,5	205	107,3	6,8	11.047,3	78	+	427,286	78	+	534,624	60	52	-7	15	7	0	5
50	6	172	-5,0	290	30,4	0,8	11.326,6	78	+	706,624	78	+	736,992	60	62	-1	17	9	0	0
51	28	66	-3,9	250	122,2	7,6	11.423,0	78	+	802,992	78	+	925,166	60	25	-8	7	4	0	5

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela J2 - Elementos Geométricos e Valores de IRVs da Descida da Serra da SP 98

km de cada								km do PC:		km do PT:		v. velocidade permitida						
PC de acordo								calculado pelos		calculado pelos								
com as Coord. Do desenho da rodovia								dados da tabela:		dados da tabela:								
AC	L	i	R	D	e	Lac	Km calculado:	Km calculado:	v	IRV _{Lg}	IRV _{Cg}	IRV _L	IRV _C	(km crescedecresc)	mortos: feridos:			
PCi	(o)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)	até PC:	km	m	(km/h)								
0								67	+ 380,000					k=	100	100	0,1	100
52	12	2106	-1,8	370	77,5	3,8	13.651,2	81	+ 31,166	81	+ 108,658	60	558	-4	155	4	0	13
53	52	193	-8,5	315	285,9	7,8	13.921,7	81	+ 301,658	81	+ 587,543	60	61	-8	17	1	0	5
54	30	119	-6,1	285	149,2	7,4	14.326,5	81	+ 706,543	81	+ 855,769	40	41	-7	5	-3	5	22
55	42	78	-12,0	305	223,6	6,7	14.553,8	81	+ 933,769	82	+ 157,345	40	27	-7	3	-3	11	33
56	91	145	-3,8	63	100,1	8,8	14.922,3	82	+ 302,345	82	+ 402,405	60	218	-9	61	36	0	12
57	55	43	-3,8	97	93,1	5,3	15.065,4	82	+ 445,405	82	+ 538,518	60	44	-5	12	24	0	11
58	35	58	-9,5	71	43,4	9,9	15.216,5	82	+ 596,518	82	+ 639,890	60	81	-10	22	30	0	0
59	40	48	-10,8	81	56,5	7,6	15.307,9	82	+ 687,890	82	+ 744,439	60	61	-8	17	27	0	2
60	20	54	-9,8	160	55,9	7,8	15.418,4	82	+ 798,439	82	+ 854,289	60	34	-8	9	10	0	17
61	10	84	-7,7	277	48,3	6,3	15.558,3	82	+ 938,289	82	+ 986,635	60	31	-6	9	4	2	1
62	52	91	-8,0	117	106,2	6,9	15.697,6	83	+ 77,635	83	+ 183,821	60	78	-7	22	17	1	12
63	58	177	-9,8	183	185,2	9,2	15.980,8	83	+ 360,821	83	+ 546,070	60	96	-9	27	6	0	17
64	28	85	-7,8	115	56,2	7,9	16.251,1	83	+ 631,070	83	+ 687,269	60	73	-8	20	17	1	2
65	41	38	-8,2	101	72,3	6,1	16.345,3	83	+ 725,269	83	+ 797,543	60	38	-6	11	22	0	6
66	39	43	-7,7	88	59,9	6,9	16.460,5	83	+ 840,543	83	+ 900,443	40	49	-7	6	7	20	50
67	15	93	-9,2	140	36,7	3,7	16.613,4	83	+ 993,443	84	+ 30,095	40	70	-4	9	5	9	23
68	70	35	-9,0	55	67,2	6,3	16.685,1	84	+ 65,095	84	+ 132,290	40	65	-6	8	17	1	4
69	44	32	-9,6	71	54,5	5,4	16.784,3	84	+ 164,290	84	+ 218,814	40	47	-5	6	12	1	12
70	42	34	-8,2	87	63,8	7,4	16.872,8	84	+ 252,814	84	+ 316,589	40	39	-7	5	7	1	9
71	36	39	-5,0	64	40,2	4,9	16.975,6	84	+ 355,589	84	+ 395,801	40	61	-5	8	15	5	28
72	47	100	-5,9	110	90,2	9,2	17.115,8	84	+ 495,801	84	+ 586,035	60	87	-9	24	17	1	9
73	25	80	-2,9	131	57,2	3,3	17.286,0	84	+ 666,035	84	+ 723,194	60	61	-3	17	18	1	13
74	135	39	0,1	45	106,0	7,7	17.382,2	84	+ 762,194	84	+ 868,223	60	80	-7	22	55	0	6
75	28	31	-0,1	151	73,8	8,5	17.519,2	84	+ 899,223	84	+ 973,015	60	19	-8	5	10	0	15
76	22	78	-4,8	162	62,2	4,7	17.671,0	85	+ 51,015	85	+ 113,219	60	48	-5	13	13	0	8
77	11	48	-7,8	216	41,5	7,1	17.781,2	85	+ 161,219	85	+ 202,688	60	22	-7	6	6	0	4
78	35	229	-10,5	151	92,2	7,8	18.051,7	85	+ 431,688	85	+ 523,929	60	155	-8	43	11	0	15
79	16	94	-7,2	205	57,2	7,2	18.237,9	85	+ 617,929	85	+ 675,175	60	46	-7	13	7	1	6
80	98	56	-4,8	79	135,1	6,4	18.351,2	85	+ 731,175	85	+ 866,299	60	70	-6	19	29	0	3
81	34	89	-7,0	137	81,3	7,6	18.575,3	85	+ 955,299	86	+ 36,596	60	64	-8	18	13	0	11
82	27	48	-6,5	140	66,0	5,6	18.704,6	86	+ 84,596	86	+ 150,570	60	34	-5	10	15	0	1
83	61	81	-6,9	82	87,3	7,5	18.851,6	86	+ 231,570	86	+ 318,871	60	98	-7	27	27	2	26
84	23	110	-7,2	176	70,7	4,4	19.048,9	86	+ 428,871	86	+ 499,522	60	64	-4	18	12	0	9
85	34	48	-7,4	81	48,1	9,9	19.167,5	86	+ 547,522	86	+ 595,588	60	57	-10	16	25	2	11
86	81	47	-6,8	78	110,3	5,4	19.262,6	86	+ 642,588	86	+ 752,858	60	61	-5	17	31	0	3
87	37	43	-7,3	107	69,1	3,6	19.415,9	86	+ 795,858	86	+ 864,956	60	42	-4	12	23	0	4
88	41	30	-7,7	92	65,8	8,7	19.515,0	86	+ 894,956	86	+ 960,790	60	32	-9	9	22	0	8
89	20	28	-7,4	161	56,2	6,9	19.608,8	86	+ 988,790	87	+ 44,989	60	17	-7	5	11	0	2
90	37	36	-7,1	66	42,6	0,7	19.701,0	87	+ 80,989	87	+ 123,610	60	58	-1	16	42	0	1
91	43	82	-7,3	122	91,6	8,9	19.825,6	87	+ 205,610	87	+ 297,170	60	66	-9	18	14	0	3
92	52	127	-8,2	73	66,3	6,7	20.044,2	87	+ 424,170	87	+ 490,423	60	176	-7	49	32	0	4
93	36	37	-6,6	107	67,2	11,1	20.147,4	87	+ 527,423	87	+ 594,653	60	33	-11	9	15	1	0
94	6	63	-2,7	148	15,5	4,0	20.277,7	87	+ 657,653	87	+ 673,151	60	42	-4	12	15	0	6
95	26	173	-3,1	195	88,5	8,5	20.466,2	87	+ 846,151	87	+ 934,640	60	84	-8	23	6	4	52
96	60	61	-3,1	74	77,5	6,9	20.615,6	87	+ 995,640	88	+ 73,132	40	79	-7	10	10	2	39
97	56	46	-5,1	78	76,2	7,9	20.739,1	88	+ 119,132	88	+ 195,368	40	57	-8	7	8	0	15
98	48	83	-4,5	149	124,8	6,4	20.898,4	88	+ 278,368	88	+ 403,194	40	54	-6	7	2	0	10
99	43	55	-5,5	133	99,8	9,4	21.078,2	88	+ 458,194	88	+ 558,010	40	39	-9	5	0	0	2
100	18	68	-8,4	237	74,5	8,7	21.246,0	88	+ 626,010	88	+ 700,465	40	28	-9	4	-3	1	13
101	42	75	-5,5	105	77,0	7,9	21.395,5	88	+ 775,465	88	+ 852,434	60	69	-8	19	19	0	7
102	12	58	-0,8	375	78,5	2,4	21.530,4	88	+ 910,434	88	+ 988,974	60	15	-2	4	5	1	24
103	86	90	1,1	109	163,6	9,0	21.699,0	89	+ 78,974	89	+ 242,581	60	74	-9	21	17	0	6
104	5	210	-7,5	950	82,9	1,1	22.072,6	89	+ 452,581	89	+ 535,484	60	23	-1	7	2	0	14
105	39	52	-8,0	158	107,5	6,0	22.207,5	89	+ 587,484	89	+ 695,032	60	33	-6	9	12	0	0
106	3	130	-5,2	270	14,1	4,0	22.445,0	89	+ 825,032	89	+ 839,169	60	49	-4	14	6	0	10
107	48	87	-7,8	220	184,3	2,2	22.546,2	89	+ 926,169	90	+ 110,476	60	42	-2	12	11	0	5
108	85	98	-8,0	83	123,1	8,1	22.828,5	90	+ 208,476	90	+ 331,609	60	117	-8	33	26	1	22
109	62	204	-8,0	104	112,5	4,9	23.155,6	90	+ 535,609	90	+ 648,147	60	202	-5	56	22	0	18
110	54	177	-4,6	185	174,4	6,8	23.445,1	90	+ 825,147	90	+ 999,506	60	93	-7	26	9	4	37
111	78	94	2,4	84	114,4	6,0	23.713,5	91	+ 93,506	91	+ 207,860	60	103	-6	29	28	0	6
112	35	38	-6,5	106	64,8	8,5	23.865,9	91	+ 245,860	91	+ 310,612	60	35	-8	10	18	0	3
113	46	46	-5,0	87	69,8	7,2	23.976,6	91	+ 356,612	91	+ 426,460	60	52	-7	14	25	0	16
114	100	84	-4,7	89	155,3	8,1	24.130,5	91	+ 510,460	91	+ 665,794	60	91	-8	25	24	0	7
115	91	0	-2,0	90	142,9	6,9	24.286,2	91	+ 666,194	91	+ 809,136	60	0	-7	0	25	0	15
116	2	156	-7,6	187	6,5	4,9	24.585,1	91	+ 965,136	91	+ 971,664	60	85	-5	24	10	0	15
117	6	119	-7,4	540	56,5	7,5	24.710,7	92	+ 90,664	92	+ 147,213	60	22	-7	6	-2	0	7
118	24	141	-7,7	193	80,8	6,8	24.908,2	92	+ 288,213	92	+ 369,056	80	73	-7	36	19	2	17
119		783	-8,4				25.772,1	93	+ 152,056	93	+ 152,056	80					2	0

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela J3 – Intervalos de Valores Geométricos dos Trechos Estudados da SP 98

AC	L	i	R	D	e
(o)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)
135	2106	7	950	286	11
2	0	-12	45	7	-5

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela J4 – Coeficientes de Correlação - Valores do Trecho do Planalto da SP 98

	IRV _{LG}	IRV _{CG}	IRV _L	IRV _C	mortos:	feridos:
IRV _{LG}	1					
IRV _{CG}	-0,36073	1				
IRV _L	0,884394	-0,36871	1			
IRV _C	0,072559	0,006144	0,201502	1		
mortos:	0,016319	-0,08331	0,024213	-0,1669	1	
feridos:	-0,17166	-0,02486	-0,16347	-0,14201	0,434219	1

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela J5 – Coeficientes de Correlação - Valores do Trecho de Serra da SP 98

	IRV _{LG}	IRV _{CG}	IRV _L	IRV _C	mortos:	feridos:
IRV _{LG}	1					
IRV _{CG}	0,066546	1				
IRV _L	0,982436	0,058954	1			
IRV _C	0,121488	-0,01231	0,174857	1		
mortos:	-0,07875	0,009709	-0,14503	-0,2668	1	
feridos:	0,079902	0,017367	0,024399	-0,28239	0,678	1

Fonte: Do Autor (2023)

Os coeficientes de correlação apresentaram-se muito reduzidos entre os valores de IRV com mortos e feridos. Há possível influência da precisão da posição dos sinistros, que tem por base o marco quilométrico.

Os valores de IRV_{CG} sofrem elevada influência da superelevação sobre a curvatura, indicando resultados não coerentes com relação à segurança, por isso esta abordagem livre, sem a velocidade, foi desconsiderada.

Na Tabela J6, apresentam-se os totais de sinistros por tipo e condição de acidentes com vítima e os valores médios por quilômetro das grandezas isoladas e dos valores médios também por quilômetro de IRV_L e IRV_C, para o trecho de Serra da SP 98, entre 2009 e 2018. Na Tabela J7 apresenta-se os coeficientes de correlação correspondentes aos grupos da Tabela J6.

Tabela J6 – Sinistros no Trecho de Serra da SP 98 de 2009 a 2018

km	L médio: (m)	i médio: (%)	R médio: (m)	D médio: (m)	e médio: (%)	IRVLG méd	IRVL méd	IRVC méd	VÑ	FT	1	2	3	4	5	6	7 TV	CL	CR	TB	CP	
80	115	5	210	68	5	63	11	8	89	3	53	5	10	0	21	1	0	58	6	4	3	3
81	125	1	205	79	5	84	23	14	67	5	29	3	10	2	10	0	1	32	2	1	6	4
82	127	-2	184	89	6	98	27	21	179	32	55	5	54	0	54	3	0	60	11	5	39	2
83	114	-5	90	73	8	116	32	26	167	32	40	3	30	2	36	2	0	43	6	2	29	10
84	70	-5	93	54	7	74	21	26	342	23	137	16	43	2	58	2	1	153	13	12	46	11
85	81	-5	104	52	6	78	22	21	93	5	51	5	5	1	16	3	0	56	6	2	11	3
86	106	-3	99	58	7	106	29	22	168	6	81	7	10	5	40	2	0	88	8	11	28	5
87	138	-1	167	117	6	102	28	17	73	3	36	6	7	2	22	0	0	42	4	2	14	4
88	221	1	225	123	5	113	31	12	257	7	138	22	3	2	55	4	1	160	13	13	39	9
89	192	2	246	119	5	72	20	8	80	3	31	6	5	2	10	0	0	37	0	3	7	3
90	180	3	176	67	6	90	25	12	113	4	44	5	4	0	38	3	0	49	3	3	32	6
91	88	2	124	49	3	68	19	20	171	12	75	6	5	2	48	1	0	81	10	9	33	2
92	252	1	164	61	4	116	32	17	23	0	8	0	0	0	9	0	0	8	0	0	7	1
								Σ:	1822	135	778	89	186	20	417	21	3	867	82	67	294	63

Veículos: 1 Automóvel; 2. Caminhonete; 3. Caminhão/trator; 4. Ônibus/microônibus; 5 Motocicleta; 6. Bicicleta; 7. Outros; TV: total de veículos. VÑ: vítima não fatal; FT: fatal

Tipo de sinistro: CT: colisão traseira; CF: Col.Frontal; CL:col. lateral; CR: Col. Transversal; CH:choque; AP: atropelamento/pedestre; AA: atropelamento/animal; TB: tombamento; CP:Capotamento; EG:engavetamento; OU: outros.

Acidentes com vítima na SP 98, de 2009 a 2018 (revisão: 2023)

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela J7 – Coeficientes de Correlação - Valores do Trecho de Serra da SP 98

	L médio:	i médio:	R médio:	D médio:	e médio:	IRVLG	IRVL	IRVC	VÑ	FT	1	2	3	4	5	6	7 TV	CL	CR	TB	CP	
L médio:	1,000																					
i médio:	0,459	1,000																				
R médio:	0,621	0,766	1,000																			
D médio:	0,504	0,232	0,703	1,000																		
e médio:	-0,419	-0,694	-0,503	-0,034	1,000																	
IRVLG	0,494	-0,333	-0,128	0,255	0,299	1,000																
IRVL	0,453	-0,421	-0,187	0,245	0,286	0,966	1,000															
IRVC	-0,569	-0,875	-0,907	-0,496	0,526	0,275	0,360	1,000														
VÑ	-0,352	-0,429	-0,347	-0,065	0,397	-0,006	0,045	0,463	1,000													
FT	-0,421	-0,545	-0,417	-0,115	0,457	0,165	0,196	0,670	0,587	1,000												
1	-0,258	-0,265	-0,197	0,007	0,255	-0,069	-0,043	0,238	0,921	0,265	1,000											
2	0,019	-0,136	0,086	0,336	0,179	0,023	0,047	-0,009	0,797	0,101	0,926	1,000										
3	-0,440	-0,495	-0,290	-0,092	0,489	0,028	0,045	0,564	0,564	0,899	0,273	0,116	1,000									
4	-0,295	-0,394	-0,347	0,039	0,331	0,155	0,226	0,315	0,305	-0,014	0,352	0,279	-0,089	1,000								
5	-0,277	-0,274	-0,311	-0,077	0,304	0,113	0,147	0,440	0,890	0,621	0,797	0,646	0,556	0,171	1,000							
6	-0,100	-0,310	-0,205	-0,056	0,420	0,213	0,217	0,239	0,589	0,376	0,595	0,540	0,289	-0,056	0,680	1,000						
7	-0,005	-0,091	0,148	0,171	0,064	-0,012	0,035	-0,010	0,535	0,065	0,601	0,669	0,146	0,189	0,277	0,158	1,000					
TV	-0,224	-0,250	-0,162	0,050	0,247	-0,058	-0,032	0,208	0,913	0,246	0,999	0,944	0,255	0,345	0,784	0,592	0,615	1,000				
CL	-0,435	-0,361	-0,326	-0,099	0,274	-0,019	-0,010	0,449	0,888	0,551	0,880	0,722	0,523	0,211	0,902	0,662	0,383	0,867	1,000			
CR	-0,219	-0,176	-0,192	-0,025	0,144	-0,042	-0,014	0,215	0,853	0,205	0,939	0,828	0,200	0,506	0,800	0,492	0,446	0,932	0,836	1,000		
TB	-0,216	-0,379	-0,379	-0,087	0,359	0,206	0,286	0,523	0,877	0,647	0,736	0,602	0,561	0,186	0,966	0,676	0,293	0,725	0,809	0,725	1,000	
CP	-0,165	-0,445	-0,320	0,073	0,650	0,241	0,252	0,353	0,739	0,435	0,642	0,636	0,332	0,316	0,537	0,450	0,556	0,647	0,473	0,484	0,597	1,000

Fonte: Do Autor (2023)

APÊNDICE K – APLICAÇÃO DO MODELO CABO DE GUARDA-CHUVA MODIFICADO EM TRECHOS DA SP 98

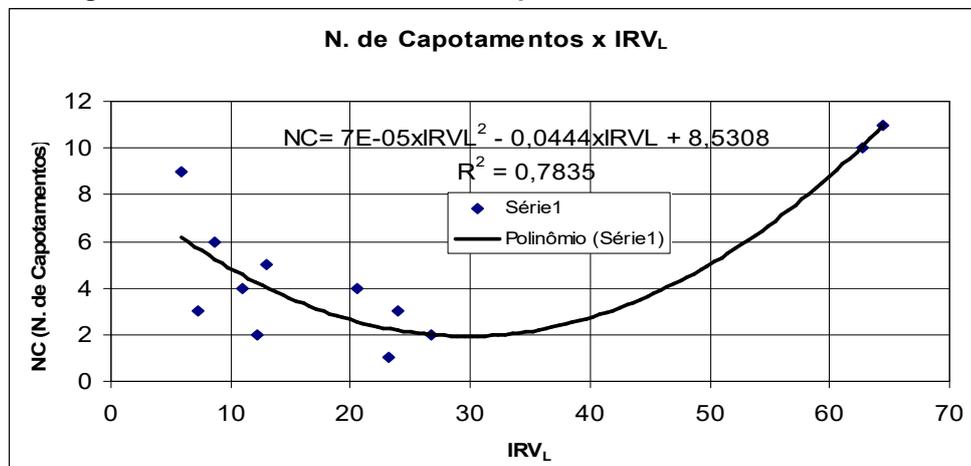
Na Tabela K1, apresenta-se os elementos da geometria da SP 98, analisados pelo Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado. A correlação maximizada entre as séries IRV_L e número de capotamentos gerou R²=0,78 para D/R², limitado a 40, segundo a Figura K1, mesmo R² é determinado, trocando-se os valores de IRV_L por IRV_C. As melhores correlações ocorreram com R e D das curvas finais de cada quilômetro.

Tabela K1 – IRV_L sob Modelo Cabo de Guarda-Chuva Modificado otimizado para Tombamentos - Valores do Trecho de Serra da SP 98

km	AC médio: (°)	L médio: (m)	i médio: (%)	R final do km: (m)	D final: (m)	e médio: (%)	D/R ² 10000	LEQ 40	IRV _L 10	VÑ	FT	ônibus micro.	TB	CP
81	34	624	-7	305	224	6	24,03	624	21	67	5	2	6	4
82	42	72	-8	277	48	8	6,30	744	27	179	32	0	39	2
83	39	88	-8	140	37	7	18,70	869	63	167	32	2	29	10
84	53	49	-5	151	74	7	32,36	991	64	342	23	2	46	11
85	36	99	-7	137	81	7	43,31	99	7	93	5	1	11	3
86	41	54	-7	161	56	7	21,68	210	13	168	6	5	28	5
87	37	83	-5	74	77	7	141,51	83	11	73	3	2	14	4
88	37	64	-5	375	79	7	5,59	225	6	257	7	2	39	9
89	36	114	-5	220	184	4	38,08	524	24	80	3	2	7	3
90	67	160	-7	185	174	7	50,94	160	9	113	4	0	32	6
91	59	70	-4	187	7	7	1,87	236	12	171	12	2	33	2
92	15	130	-8	193	81	7	21,70	447	23	23	0	0	7	1

Fonte: Do Autor (2023)

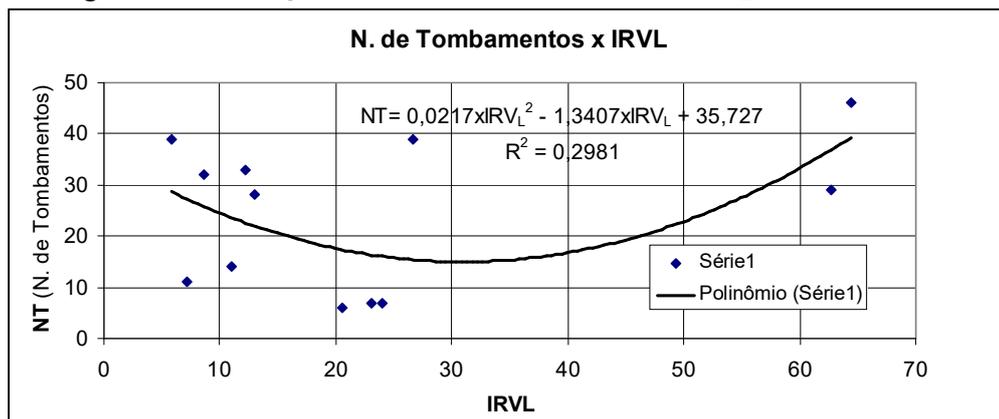
Figura K1 Correlação entre N. de Capotamentos e IRV_L - Serra da SP 98



Fonte: do autor (2023)

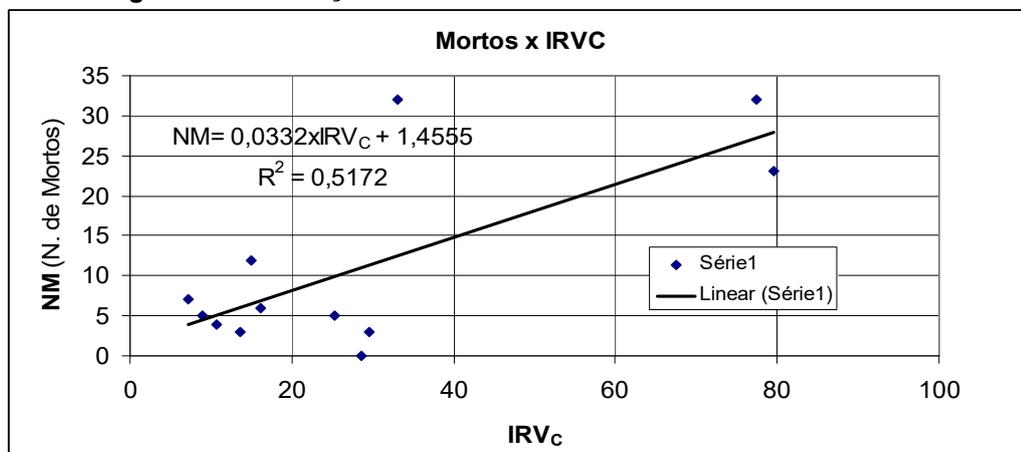
Na análise para a correlação entre valores de IRV_L e número de tombamentos, tal como se observa na Figura K2, o $R^2=0,29$, foi obtido para D/R^2 limitado a 40, valor que indica baixa qualidade de correlação. Na análise para a correlação entre valores de IRV_C e número de mortos nos acidentes pesquisados, considerando a velocidade de referência 40 km/h e $D/R^2=40$, tal como se observa na Figura K3, tem-se $R^2=0,52$, que também indica baixa qualidade de correlação contudo, está próximo de 0,6, tomado como valor mínimo, caso um tratamento gere aumento na qualidade da correlação. A correlação entre número de mortos e IRV_L , tal como se observa na Figura K4, é de $R^2=0,52$, obtida para D/R^2 , limitado a 35. A Figura K5, da correlação IRV_L e vítimas não fatais $R^2=0,46$, uma correlação com potencialidade de melhoria, para D/R^2 , limitado a 40.

Figura K2 Correlação entre N. de Tombamentos e IRV_L – Serra da SP 98



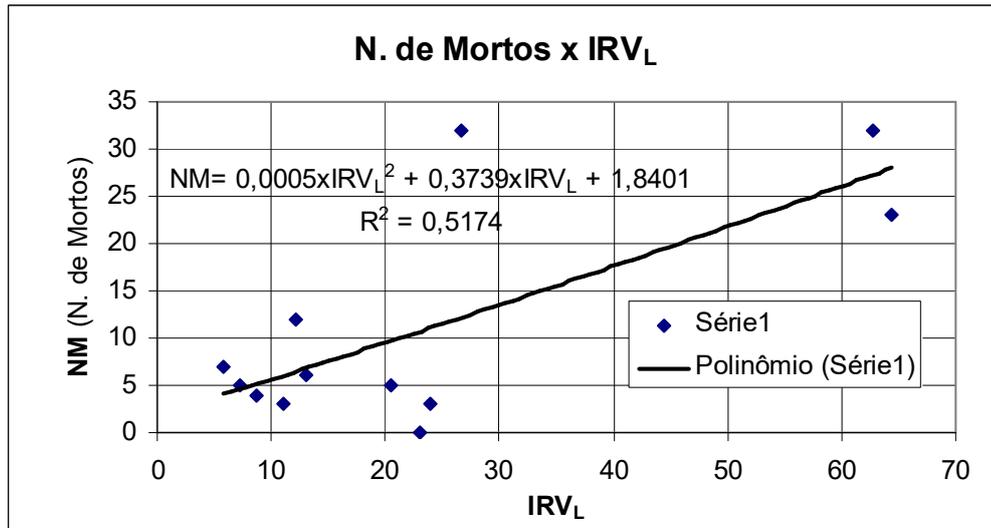
Fonte: do Autor (2023)

Figura K3 Correlação entre N. de Mortos x IRV_C – Serra da SP 98



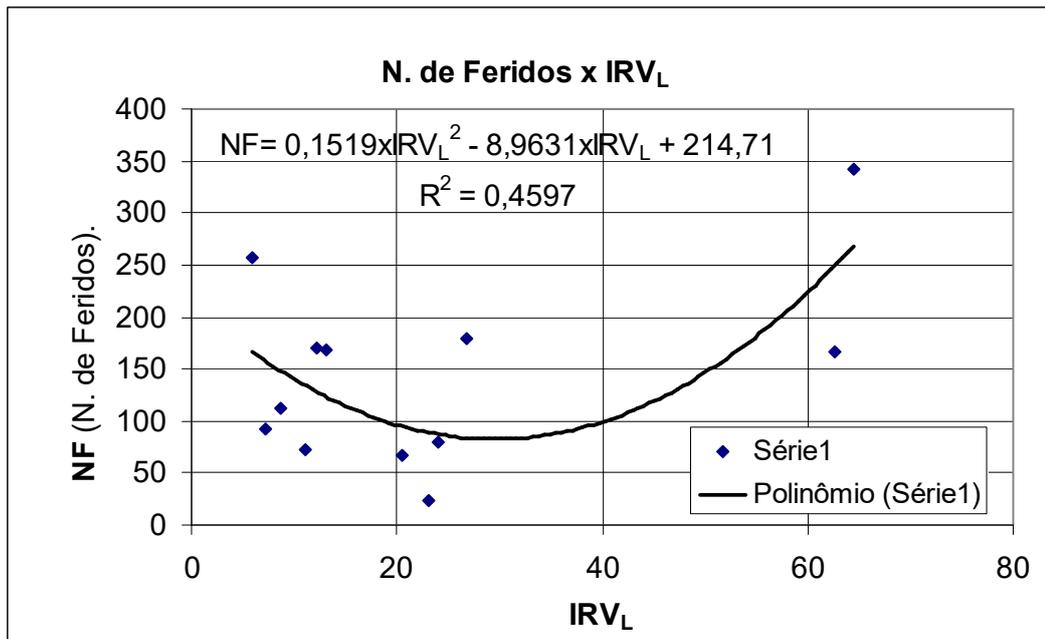
Fonte: do Autor (2023)

Figura K4 Correlação entre N. de Acidentes com Vítimas Fatais e IRV_L – Serra da SP 98



Fonte: do Autor (2023)

Figura K5 Correlação entre N. de Acidentes com Vítimas Não Fatais e IRV_L – Serra da SP 98



Fonte: do Autor (2023)

APÊNDICE L – APLICAÇÃO DO MODELO ARCO-ÍRIS EM TRECHOS DA SP 98

O Modelo Arco-Íris foi aplicado a trechos da SP 98, entre Mogi das Cruzes e Bertioga, no Estado de São Paulo. Estes trechos são de Serra e de Planalto adjacente, e foram adotados para a associação das grandezas físicas e acidentes, tanto com vítima como sem vítima, ocorridos ao longo do período de 2009 a 2018. Visa avaliar a qualidade de possíveis regressões com distintos tipos de acidentes e veículos, enquanto se determina a Velocidade Média de Sinistro. A Tabela L1 ilustra parte da planilha de dados referentes ao trecho lindeiro da Serra. A Tabela L2, relativa ao trecho de Serra da SP 98, entre os quilômetros 80 e 92, resultante da busca da melhor correlação entre IRV_C e Número de Tombamentos veiculares, presente na Figura L1. Para se atingir $R^2=0,8132$, estabeleceu-se procedimento de maximização de R^2 sob variação isolada de cada grandeza.

As Tabelas de L3 a L8 apresentam quadros de valores de teste para maximização de R^2 , sob variação de flecha de campo visual (M) em: 6; 7; 8; 9; 11 e 12, respectivamente. Varia-se o excesso de velocidade em cada tabela. Considera-se valores constantes para as outras grandezas: velocidade limite, igual à permitida na maior parte da serra, de 40 km/h, coeficiente de atrito longitudinal 0,3 e coeficiente de atrito transversal 0,4. Em seguida, novas planilhas foram executadas, visando “ajuste fino” que permitisse aumentar, ainda que pouco, o R^2 , até se atingir os valores da Tabela L9.

Os valores da Tabela L9 estão apresentados na parte superior da Tabela L2. O valor máximo de R^2 é 0,8134, para o trecho de Serra da SP 98, considerando acidentes com vítima, coeficiente de atrito longitudinal $f=0,3$ e transversal $f_t=0,27$, com flecha do campo visual: $M=12$ m.

Tabela L2 Geometria SP 98 na Serra Para Aplicação do Modelo Arco-Íris - Exemplo

km do PC:		km do PT:		Desenho da		Li(m)		vi (km/h)		acel. linear		vF (km/h)		vR (estab.)		acel. centr.		vR (visib.)		vRmin			
calculado pelos dados da tabela:		calculado pelos dados da tabela:		rodo\AC		L		i		R		D		e		Lac		anterior		rampa:		da curva	
km	m	km	m	PCi	(o)	(m)	(%)	(m)	(%)	IRV _L	IRV _c	até PC:	(m)	(m/s2)	(km/h)	(m/s2)	(km/h)	(m/s2)	(km/h)	(m/s2)	(km/h)	(m/s2)	(km/h)
81	31,17	81	108,86	52	12	2106	-1,8	370	77	3,8	303	5	13651	11.459	50	0,17	50	126	3,31	92	72		
81	301,66	81	587,54	53	52	193	-8,5	315	266	7,8	373	6	13922	11.730	50	0,84	50	123	3,71	78	78		
81	706,54	81	855,77	54	30	119	-6,1	285	149	7,4	418	7	14327	12.135	50	0,59	50	116	3,67	80	80		
81	933,77	82	157,35	55	42	78	-12,0	305	224	6,7	424	6	14554	12.362	50	1,18	50	119	3,60	71	71		
médica:						624		-7,1		319		184		6		380		6,2					
82	302,35	82	402,41	56	91	145	-3,8	63	100	8,8	1904	31	14922	12.663	50	0,37	50	56	3,80	52	52		
82	445,41	82	538,52	57	55	43	-3,8	97	93	5,3	1298	20	15065	12.806	50	0,37	50	66	3,46	60	60		
82	596,52	82	639,89	58	35	58	-9,5	71	43	9,9	1802	28	15217	12.958	50	0,93	50	60	3,91	49	49		
82	687,89	82	744,44	59	40	48	-10,8	81	57	7,6	6	24	15308	48	49	1,06	50	62	3,69	50	50		
82	798,44	82	854,29	60	20	54	-9,8	160	56	7,8	3	12	15418	54	50	0,97	50	88	3,71	62	62		
82	938,29	82	986,63	61	10	84	-7,7	277	48	6,3	7	7	15558	194	50	0,76	50	113	3,56	76	76		
médica:						72		-7,6		125		66		8		837		20					
83	77,63	83	183,82	62	52	91	-8,0	117	106	6,9	28	17	15698	326	50	0,79	50	74	3,62	59	59		
83	360,82	83	546,07	63	58	177	-9,8	183	185	9,2	33	11	15981	609	50	0,96	50	95	3,84	65	65		
83	631,07	83	687,27	64	28	85	-7,8	115	56	7,9	76	17	16251	880	50	0,77	50	74	3,72	59	59		
83	725,27	83	797,54	65	41	38	-8,2	101	72	6,1	98	19	16345	974	50	0,80	50	68	3,54	56	56		
83	840,54	83	900,44	66	39	43	-7,7	88	60	6,9	124	22	16461	1.089	50	0,76	50	64	3,62	54	54		
83	993,44	84	30,10	67	15	93	-9,2	140	37	3,7	93	14	16613	1.242	50	0,90	50	78	3,31	61	61		
médica:						87,8		-8,4		124		86		7		75,4		17					
84	65,10	84	132,29	68	70	35	-9,0	55	67	6,3	255	36	16685	1.372	50	0,88	50	50	3,56	46	46		
84	164,29	84	218,81	69	44	32	-9,6	71	55	5,4	5	28	16784	32	46	0,94	50	57	3,47	49	49		
84	252,81	84	316,59	70	42	34	-8,2	87	64	7,4	4	23	16873	34	49	0,81	50	64	3,67	53	53		
84	355,59	84	395,80	71	36	39	-5,0	64	40	4,9	21	31	16976	137	50	0,50	50	53	3,42	51	51		
84	495,80	84	586,03	72	47	100	-5,9	110	90	9,2	24	18	17116	277	50	0,58	50	74	3,84	60	60		
84	666,03	84	723,19	73	25	80	-2,9	131	57	3,3	34	15	17286	447	50	0,29	50	75	3,27	66	66		
84	762,19	84	868,22	74	135	39	0,1	45	106	7,7	111	44	17382	543	50	0,00	50	46	3,70	49	46		
84	899,22	84	973,02	75	28	31	-0,1	151	74	8,5	2	11	17519	31	46	0,01	47	86	3,77	72	72		
médica:						48,8		-5,1		89,3		69		7		57		26					
85	51,02	85	113,22	76	22	78	-4,8	162	62	4,7	8	12	17671	136	47	0,48	50	85	3,41	69	69		
85	161,22	85	202,69	77	11	48	-7,8	216	41	7,1	11	9	17781	246	50	0,77	50	101	3,64	71	71		
85	431,69	85	523,93	78	35	229	-10,5	151	92	7,8	35	13	18052	516	50	1,03	50	85	3,71	60	60		
85	617,93	85	675,18	79	16	94	-7,2	205	57	7,2	34	10	18238	703	50	0,71	50	98	3,65	71	71		
85	731,18	85	866,30	80	98	56	-4,8	79	135	6,4	101	25	18351	816	50	0,47	50	60	3,57	55	55		
85	955,30	86	36,60	81	34	89	-7,0	137	81	7,6	75	14	18575	1.040	50	0,68	50	81	3,69	63	63		
médica:						99		-7		158		78		7		44,2		14					
86	84,60	86	150,57	82	27	48	-6,5	140	66	5,6	87	14	18705	1.210	50	0,64	50	80	3,49	64	64		
86	231,57	86	318,87	83	61	81	-6,9	82	87	7,5	164	24	18852	1.357	50	0,68	50	63	3,68	54	54		
86	428,87	86	499,52	84	23	110	-7,2	176	71	4,4	91	11	19049	1.555	50	0,71	50	88	3,38	67	67		
86	547,52	86	595,59	85	34	48	-7,4	81	48	9,9	200	24	19168	1.673	50	0,73	50	64	3,91	53	53		
86	642,59	86	752,86	86	81	47	-6,8	78	110	5,4	229	25	19263	1.768	50	0,66	50	59	3,47	53	53		
86	795,86	86	864,96	87	37	43	-7,3	107	69	3,6	186	18	19416	1.922	50	0,72	50	68	3,30	58	58		
86	894,96	86	960,79	88	41	30	-7,7	92	66	8,7	216	21	19515	2.021	50	0,76	50	67	3,80	55	55		
86	988,79	87	44,99	89	20	28	-7,4	161	56	6,9	131	12	19609	2.115	50	0,73	50	87	3,62	65	65		
médica:						54,4		-7,2		115		72		7		163		19					
87	80,99	87	123,81	90	37	36	-7,1	66	43	0,7	354	30	19701	2.199	50	0,70	50	51	3,01	50	50		
87	205,61	87	297,17	91	43	82	-7,3	122	92	8,9	186	16	19826	2.323	50	0,71	50	78	3,82	60	60		
87	424,17	87	490,42	92	52	127	-8,2	73	66	6,7	352	27	20044	2.542	50	0,80	50	58	3,60	51	51		
87	527,42	87	594,65	93	36	37	-6,6	107	67	##	234	18	20147	2.645	50	0,64	50	75	4,03	59	59		
87	657,65	87	673,15	94	6	63	-2,7	148	15	4,0	185	13	20278	2.775	50	0,27	50	80	3,34	69	69		
87	846,15	87	934,64	95	26	173	-3,1	195	88	8,5	143	10	20466	2.964	50	0,31	50	98	3,77	75	75		
87	995,64	88	73,13	96	60	61	-3,1	74	77	6,9	404	27	20616	3.113	50	0,61	50	59	3,62	55	55		
médica:						82,7		-5,4		112		64		7		265		20					
88	119,13	88	195,37	97	56	46	-5,1	78	76	7,9	404	25	20739	3.252	50	0,50	50	61	3,72	55	55		
88	278,37	88	403,19	98	48	83	-4,5	149	125	6,4	224	13	20898	3.411	50	0,44	50	83	3,57	67	67		
88	458,19	88	558,01	99	43	55	-5,5	133	100	9,4	258	15	21078	3.591	50	0,54	50	82	3,87	64	64		
88	626,01	88	700,47	100	18	68	-8,4	237	74	8,7	157	8	21248	3.759	50	0,82	50	108	3,80	72	72		
88	775,47	88	852,43	101	42	75	-5,5	105	77	7,9	362	19	21395	3.908	50	0,54	50	71	3,72	59	59		
88	910,43	88	988,97	102	12	58	-0,8	375	79	2,4	106	5	21530	4.043	50	0,08	50	124	3,17	94	94		
médica:						64,2		-5		180		88		7		252		14					
89	78,97	89	242,58	103	86	90	1,1	109	164	9,0	345	18	21699	4.180	50	0,00	50	74	3,83	66	66		
89	452,58	89	535,48	104	5	210	-7,5	950	83	1,1	51	2	22073	4.553	50	0,73	50	194	3,05	110	110		
89	587,48	89	695,03	105	39	52	-8,0	158	108	6,0	301	12	22207	4.688	50	0,78	50	85	3,53	64	64		
89	825,03	89	839,17	106	3	130	-5,2	270	14	4,0	184	7	22445	4.926	50	0,51	50	108	3,34	80	80		
89	926,17	90	110,48	107	48	87	-7,8	220	184	2,2	241	9	22546	5.027	50	0,76	50	95	3,16	71	71		
médica:						114		-5,5		341		111		4		224		9,7					
90	208,48	90	331,81	108	85	98	-8,0	83	123	8,1	634	24	22828	5.298	50	0,78	50	63	3,73	53	53		
90	535,61	90	648,15	109	62	204	-8,0	104	113	4,9	556	19	23158	5.625	50	0,78	50	68	3,42	57	57		

Tabela L3 Max. de R² para N. de Tombamentos – Exc. De Velocidade e M= 6m

Coeficiente de Determinação (R ²)				
considerando:				ft=0,4
tráfego: 2005 a 2022		trecho: Serra (km 80 ao 92)		
f coef. Atrito M Flecha do				
excesso de vel. (%)	vel. Máx. (km/h)	longit. pav. Molhadc	campo visual (m)	R2
0	40,0	0,3	6	0,7971
10	44,0	0,3	6	0,7987
20	48,0	0,3	6	0,7988
30	52,0	0,3	6	0,8076
31	52,4	0,3	6	0,8082
32	52,8	0,3	6	0,8090
33	53,2	0,3	6	0,8091
34	53,6	0,3	6	0,8086
35	54,0	0,3	6	0,8080
36	54,4	0,3	6	0,8064
37	54,8	0,3	6	0,8043
38	55,2	0,3	6	0,8019
40	56,0	0,3	6	0,7968

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela L4 Max. de R² para N. de Tombamentos – Exc. De Velocidade e M= 7m

Coeficiente de Determinação (R ²)				
considerando:				ft=0,4
tráfego: 2005 a 2022		trecho: Serra (km 80 ao 92)		
f coef. Atrito M Flecha do				
excesso de vel. (%)	vel. Máx. (km/h)	longit. pav. Molhadc	campo visual (m)	R2
0	40	0,3	7	0,7968
10	44	0,3	7	0,7979
20	48	0,3	7	0,7991
30	52	0,3	7	0,8033
33	53,2	0,3	7	0,8066
35	54	0,3	7	0,8088
36	54,4	0,3	7	0,8086
37	54,8	0,3	7	0,8091
38	55,2	0,3	7	0,8088
40	56	0,3	7	0,8067
50	60	0,3	7	0,7794
60	64	0,3	7	0,7538
70	68	0,3	7	0,7251
80	72	0,3	7	0,7088

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela L5 Max. de R² para N. de Tombamentos – Exc. De Velocidade e M= 8m

Coeficiente de Determinação (R ²)				
considerando: $f_t=0,4$				
tráfego: 2005 a 2022		trecho: Serra (km 80 ao 92)		
f coef. Atrito M Flecha do				
excesso	vel. Máx.	longit.	campo	R2
de vel. (%)	(km/h)	pav. Molhad	visual (m)	
0	40,0	0,3	8	0,7968
10	44,0	0,3	8	0,7971
20	48,0	0,3	8	0,7985
30	52,0	0,3	8	0,7998
33	53,2	0,3	8	0,8017
35	54,0	0,3	8	0,8037
38	55,2	0,3	8	0,8070
40	56,0	0,3	8	0,8085
42	56,8	0,3	8	0,8096
44	57,6	0,3	8	0,8078
46	58,4	0,3	8	0,8042
48	59,2	0,3	8	0,7989
50	60,0	0,3	8	0,7942

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela L6 Max. de R² para N. de Tombamentos – Exc. De Velocidade e M= 9m

Coeficiente de Determinação (R ²)				
considerando: $f_t=0,4$				
tráfego: 2005 a 2022		trecho: Serra (km 80 ao 92)		
f coef. Atrito M Flecha do				
excesso	vel. Máx.	longit.	campo	R2
de vel. (%)	(km/h)	pav. Molhad	visual (m)	
0	40,0	0,3	9	0,7968
10	44,0	0,3	9	0,7970
20	48,0	0,3	9	0,7980
30	52,0	0,3	9	0,7996
40	56,0	0,3	9	0,8046
42	56,8	0,3	9	0,8069
44	57,6	0,3	9	0,8084
46	58,4	0,3	9	0,8096
48	59,2	0,3	9	0,8084
50	60,0	0,3	9	0,8051

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela L7 Max. de R² para N. de Tombamentos – Exc. De Velocidade e M= 11 m

		Coeficiente de Determinação (R ²)			c
		considerando:			ft=0,4
tráfego: 2005 a 2022		trecho: Serra (km 80 ao 92)			
		f coef. Atrito M Flecha do			
excesso	vel. Máx.	longit.	campo	R2	
de vel. (%)	(km/h)	pav. Molhad	visual (m)		
0	40,0	0,3	11	0,7968	
10	44,0	0,3	11	0,7970	
20	48,0	0,3	11	0,7971	
30	52,0	0,3	11	0,7982	
40	56,0	0,3	11	0,8003	
50	60,0	0,3	11	0,8070	
52	60,8	0,3	11	0,8088	
53	61,2	0,3	11	0,8094	
54	61,6	0,3	11	0,8097	
55	62,0	0,3	11	0,8093	
56	62,4	0,3	11	0,8083	
57	62,8	0,3	11	0,8067	

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela L8 Max. de R² para N. de Tombamentos – Exc. De Velocidade e M= 12m

		Coeficiente de Determinação (R ²)			c
		considerando:			ft=0,4
tráfego: 2005 a 2022		trecho: Serra (km 80 ao 92)			
		f coef. Atrito M Flecha do			
excesso	vel. Máx.	longit.	campo	R2	
de vel. (%)	(km/h)	pav. Molhad	visual (m)		
0	40,0	0,3	12	0,7968	
10	44,0	0,3	12	0,7970	
20	48,0	0,3	12	0,7971	
30	52,0	0,3	12	0,7977	
40	56,0	0,3	12	0,7995	
50	60,0	0,3	12	0,8045	
55	62,0	0,3	12	0,8084	
57	62,8	0,3	12	0,8095	
58	63,2	0,3	12	0,8098	
59	63,6	0,3	12	0,8088	
60	64,0	0,3	12	0,8076	

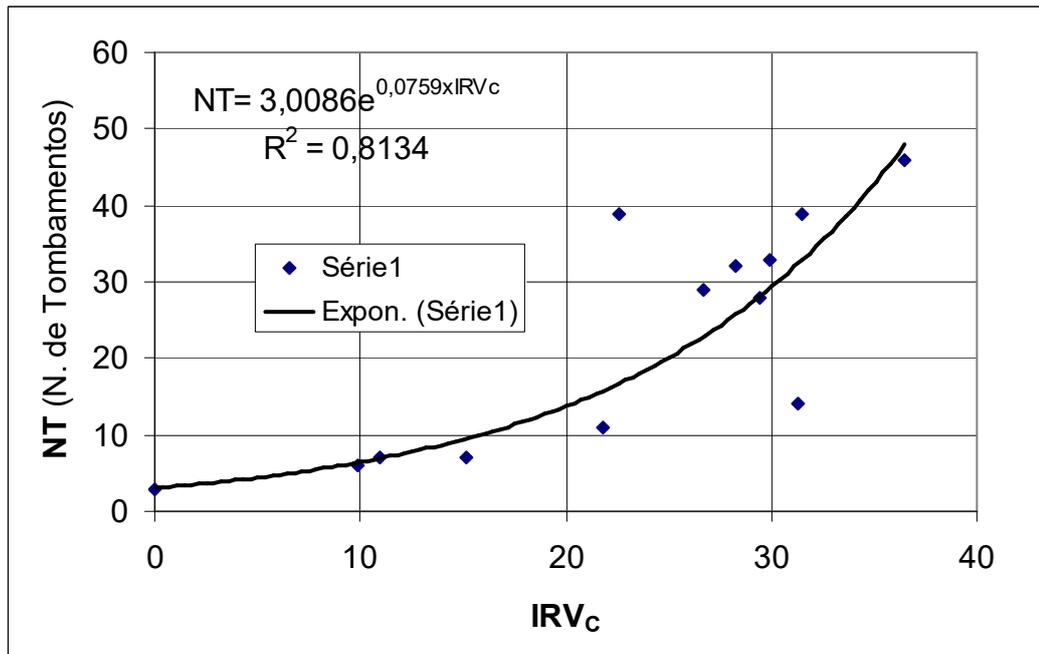
Fonte: Do Autor (2023)

Tabela L9 Maximização de R2 para Número de Tombamentos – Var: Velocidade

Coeficiente de Determinação (R2)				
considerando:				
trecho: Serra (km 80 ao 92)				
f coef. Atrito		M Flecha do	f coef. Atrito	
vel. Máx.	longit.	campo	transversal:	R2
(km/h)	pav. Molhadc	visual (m)	(ft)	
54,0	0,30	12	0,27	0,7997
56,0	0,30	12	0,27	0,8007
57,0	0,30	12	0,27	0,8112
57,5	0,30	12	0,27	0,8130
58,0	0,30	12	0,27	0,8134
60,0	0,30	12	0,27	0,8052
64,0	0,30	12	0,27	0,8128
68,0	0,30	12	0,27	0,7972

Fonte: Do Autor (2023)

Figura L1– Regressão entre o Número de Tombamentos x IRV_c (SP 98 – Serra)



Fonte: do autor (2023)

Velocidade de referência: permitida, de **40 km/h**, excesso de velocidade: **58%**; f=**0,30**;
ft=**0,27**; flecha: M=**12,0 m**, acidentes com vítima, de 2009 a 2018.

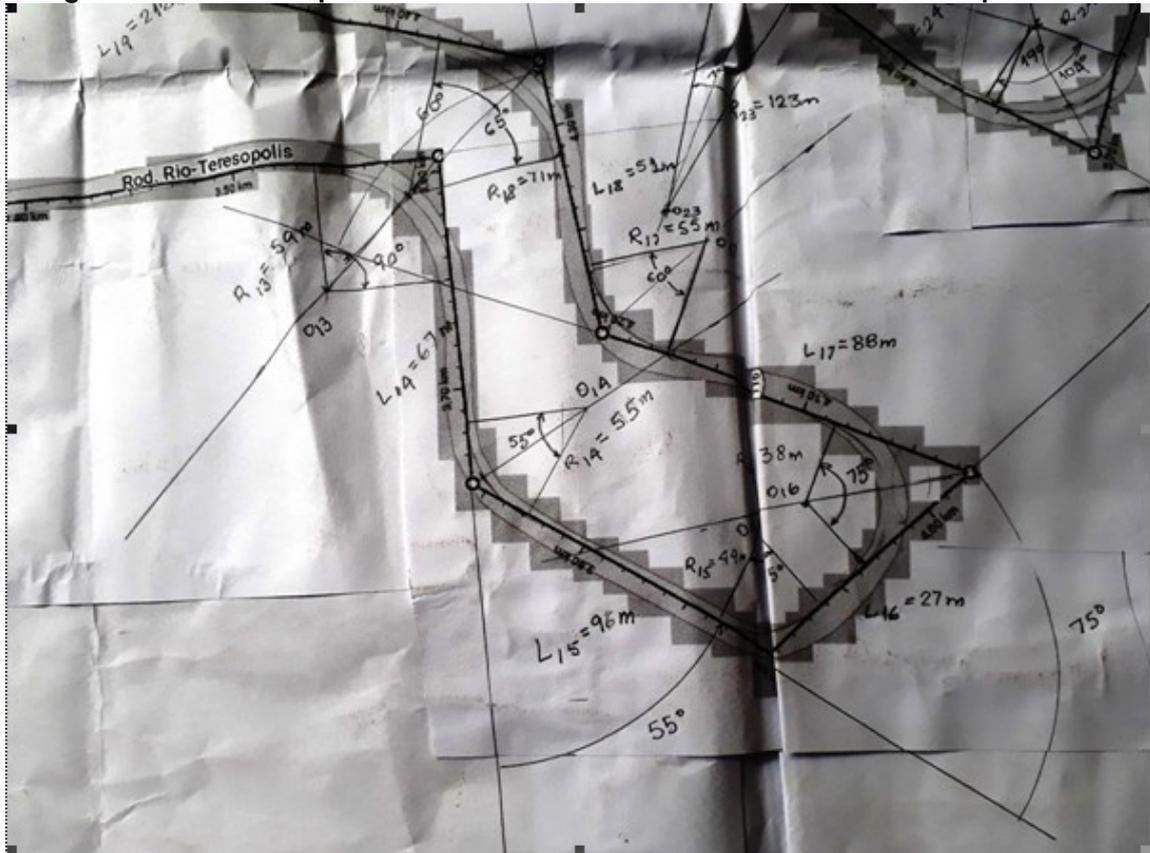
APÊNDICE M – APLICAÇÃO DO MODELO ARCO-ÍRIS EM TRECHO DA BR 116 – MUNICÍPIO DE GUAPIMIRIM/RJ

Visando validar o Modelo Arco-Íris, anteriormente testado na SP 98 sob valores de R^2 aceitáveis a elevados, escolheu-se um trecho de Serra ao longo da BR 116, de Teresópolis a Guapimirim, no Estado do Rio de Janeiro. A análise foi estabelecida em sentido da descida da Serra, cuja totalidade da extensão de pesquisa está situada integralmente no município de Guapimirim, fato que facilita a segregação dos acidentes de arquivos de domínio público, que associam sinistros ao ponto de ocorrência e ao município.

Esta parte da pesquisa visa validar o Modelo Arco-Íris, quanto às associações entre geometria da via e acidentes, a partir de bancos de dados de sinistros, compostos tanto com vítima como sem vítima, ocorridos ao longo do mesmo período dos testes aplicados ao trecho da SP 98, tendo como parâmetro de avaliação os valores de coeficientes de determinação. A velocidade média de sinistros continua sendo estabelecida com base no excesso de velocidade em relação à velocidade tomada de referência ou permitida no trecho. Como não se teve acesso ao desenho da rodovia até outubro de 2023, optou-se pelo uso dos dados abertos, segundo informações gráficas presentes nos ambientes *Google Maps*, *Google Earth* e *Google Street*.

Um processo de tratamento dos dados foi elaborado para a estimativa dos raios, ângulos centrais e extensões de tangentes, segundo as informações do traçado da via em planta presentes no *Google Maps*. Traçou-se um alinhamento de tangentes sobre folhas impressas do traçado do trecho pretendido, a partir de imagens do Google Maps. Este procedimento visa simplificar o eixo para tangentes e curvas horizontais circulares simples bem como desconsidera possíveis deflexões mínimas, com raios de grande magnitude. A Figura M1 apresenta reprodução de parte da via, sob tratamento gráfico, com a inserção gráfica de tangentes e curvas circulares, de forma a que o eixo fique inscrito na plataforma que “aparece” sobre as rodovias, no ambiente *Google Maps*. Esta plataforma não necessariamente é a plataforma real e nem a plataforma real é a que resguarda o eixo e sim a pista. Contudo, trata-se de método para estabelecer o eixo traçado em folhas impressas.

Figura M1 Parte da Impressão e Tratamento dos dados da BR 116 em Guapimirim/RJ



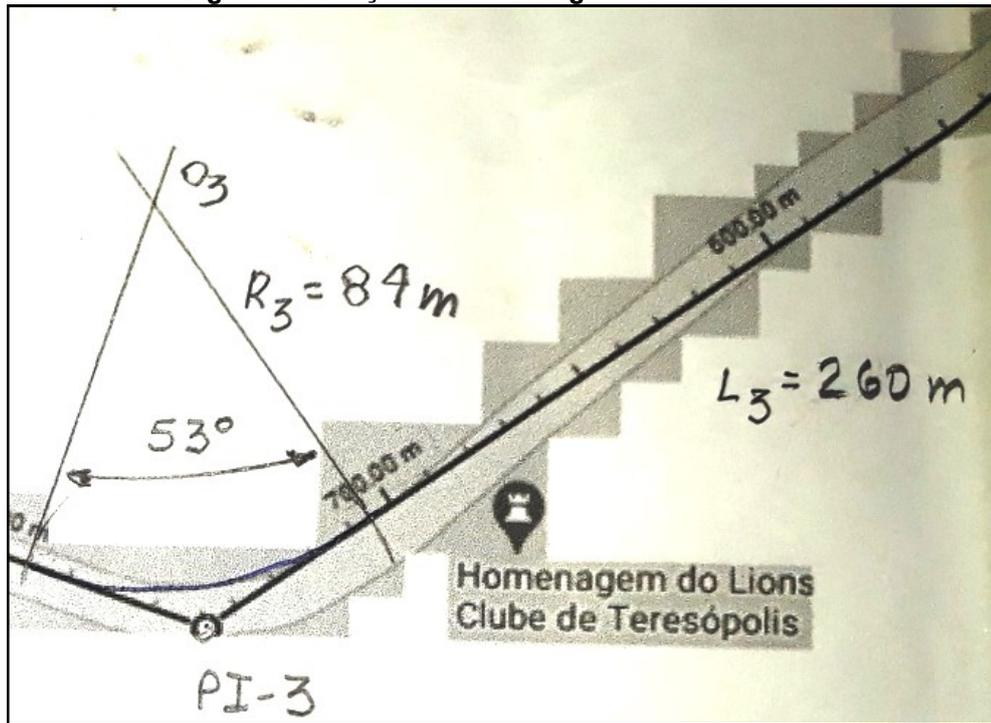
Fonte: Do Autor, adaptado de Google Maps (2023)

Há outro fator de relevo no uso desta fonte de dados. Grande parte de rodovias da malha brasileira não dispõem de desenhos ou estes são restritos ao acesso. O uso de dados abertos para estudos de segurança associada à geometria pode se tornar poderosa fonte de dados para análise de praticamente todas as rodovias brasileiras. O método da obtenção dos elementos em planta está descrito no Quadro M1. A Figura M2 apresenta segmento com lançamento do eixo sobre a plataforma presente nas imagens do *Google Maps*.

Quadro M1 Sequência de Ações para o Levantamento de Dados de Geometria da BR 116 – Guapimirim/RJ

Descrição:
<p>Seleção do trecho de Levantamento dos dados de Raios horizontais e superelevação, extensão e declividade de tangentes: Lançamento de alinhamento sobre o eixo presente no Google Maps, para obtenção dos pontos inicial, final e dos Pontos de Inflexão das tangentes, com ferramenta de medição de extensão. As tangentes devem ser lançadas com posicionamento interno à plataforma, buscando representar possível movimento veicular de “suavização do traçado”, como uma ação comum dos motoristas que tendem a estabelecer possíveis velocidades mais altas. Quando a “linha quebrada” (do alinhamento) estiver fora da plataforma apresentada no Google Maps, estabelece-se um novo “PI”. Este critério de lançamento das tangentes não visa estabelecer necessariamente o traçado físico e sim o possível traçado de percurso veicular.</p>
<p>Estabelecimento dos trechos circulares: como o Modelo estudado simplifica o traçado em tangentes e curvas horizontais, para facilitar a análise da influência da aceleração centrípeta como elemento indutor de acidentes; busca-se representar um dos possíveis traçados de percurso efetivado por motoristas, desprezando-se os trechos de raio variável bem como de curvas horizontais de raio elevado. Para a inserção dos segmentos circulares imprimem-se partes do trecho em estudo. Em sequência, as medições são efetuadas com processo gráfico. Com transferidor, medem-se as <u>deflexões dos alinhamentos</u>, após traçar com régua a extensão dos alinhamentos nos PIs correspondentes. A precisão do transferidor é suficiente para a leitura de ângulos de deflexão em graus arredondados para números inteiros. Buscam-se os possíveis pontos de início e término dos segmentos circulares, traçando sobre estes perpendiculares, para localizar o “centro O” dos segmentos circulares. Com compasso, traçam-se os trechos circulares</p>
<p>Leitura das extensões de tangentes e de raios: sobre o desenho resultante, medem-se, com régua ou escalímetro, as <u>tangentes e raios</u>, com precisão de metros inteiros. A escala da leitura é a que está apresentada de forma gráfica nas folhas impressas.</p>
<p>Determinação das declividades das tangentes: com o recurso de determinação de rota pelo Google Maps, para bicicletas, determinam-se as declividades segundo o quociente das cotas das extremidades do percurso e a extensão, apresentados em tela lateral. Como visam-se declividades e não cotas absolutas, supõem-se suficientes para o estudo as declividades determinadas.</p>
<p>Determinação das superelevações: no ambiente <i>Google Street</i> Em função da única oferta de dados abertos onde se pode observar a superelevação, segundo imagens de projeções cônicas presentes no <i>Google Street</i>, formulou-se um processo expedito de levantamento da declividade transversal, a ser subentendida apenas como dado a contribuir de forma quase binária na avaliação, ou seja, que há ou não superelevação e um valor de tendência de declividade, determinado segundo critério adotado mas de forma a permitir ser reproduzido. Assim, pode-se incluir nas análises algum valor contributivo nas análises, de forma que sua contribuição possa ser avaliada quanto à influência no coeficiente de determinação das regressões (R^2). O método proposto e efetivado de obtenção da tendência de superelevação segue a seguinte sequência: através do Google Street, posicionar o ícone do visualizador (imagem que alude um perfil de homem, usado para arrastar até ao local de observação) em ponto anterior ao início da curva horizontal que se pretende estudar a superelevação. Em seguida, orientar o visualizador para que fique em posição de observação alinhada com a tangente anterior da curva, ou seja, que a seta presente à frente do campo de observação do visualizador fique em condição paralela à tangente lateral. Em seguida, movimentar o cursor para que a vista fique em posição de observação de ponto de fuga da projeção cônica (em outras palavras, que a imagem não tenha foco nem abaixo nem acima da linha de “infinito). Busca-se uma linha perpendicular sobre o pavimento, que pode ser a trinca de reflexão de antigo pavimento rígido que se tornou base do pavimento flexível ou ainda possíveis linhas de junta de fases contrutivas. No trecho de Serra estudado, há claramente a presença de base do pavimento correspondente a pavimento rígido antigo. Lança-se uma linha sobre a perpendicular bem como outras duas linhas, uma horizontal e outra vertical. O valor denominado de tendência de superelevação será obtido pelo quociente entre a altura e extensão horizontal. Doravante, os valores devem ser lançados no modelo estudado, mais especificamente, nas planilhas eletrônicas, para avaliação da contribuição nas regressões.</p>
<p>Transferência dos Dados: os valores de raios, superelevação, declividade e extensão de tangentes são inseridos em planilha eletrônica para análise integrada do percurso viário.</p>

Figura M2 Lançamento da Tangente de PI-2 a PI-3:



Fonte: Google Maps, adaptado pelo Autor (2023)

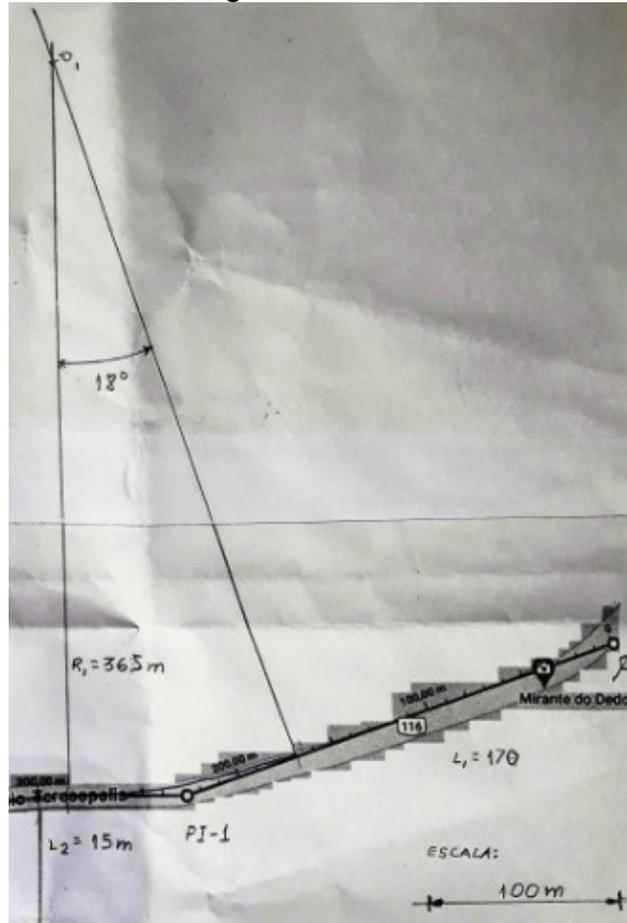
A escala das folhas impressas foi obtida por leitura direta na medição de distância presente no eixo, que, por sua vez, foi estabelecida pela ferramenta “Medição de distância”. Doravante, foi considerada como escala gráfica a ser usada para as estimativas das magnitudes de raios e tangentes.

A Figura M3 apresenta a impressão com inserção do primeiro segmento, do ponto 0 (zero) ao PI-1, com extensão $L_1=170\text{m}$; raio $R_1= 365\text{ m}$ e $AC_1=18^\circ$, medidos na escala gráfica da figura e deflexão com transferidor. A superelevação da curva “1” teve sua “tendência” de inclinação estabelecida pelo quociente entre as medidas B e A, presentes na Figura M4.

A Tabela M1 ilustra parte da planilha de dados referentes ao trecho de Serra da BR 116 em Guapimirim, com variáveis ajustadas para máximo R^2 para o total de veículos em acidentes sem vítima, considerando a superelevação. A Tabela M2 apresenta os valores médios por quilômetro, das grandezas estudadas e os valores de IRV correspondentes aos dados da Tabela M1.

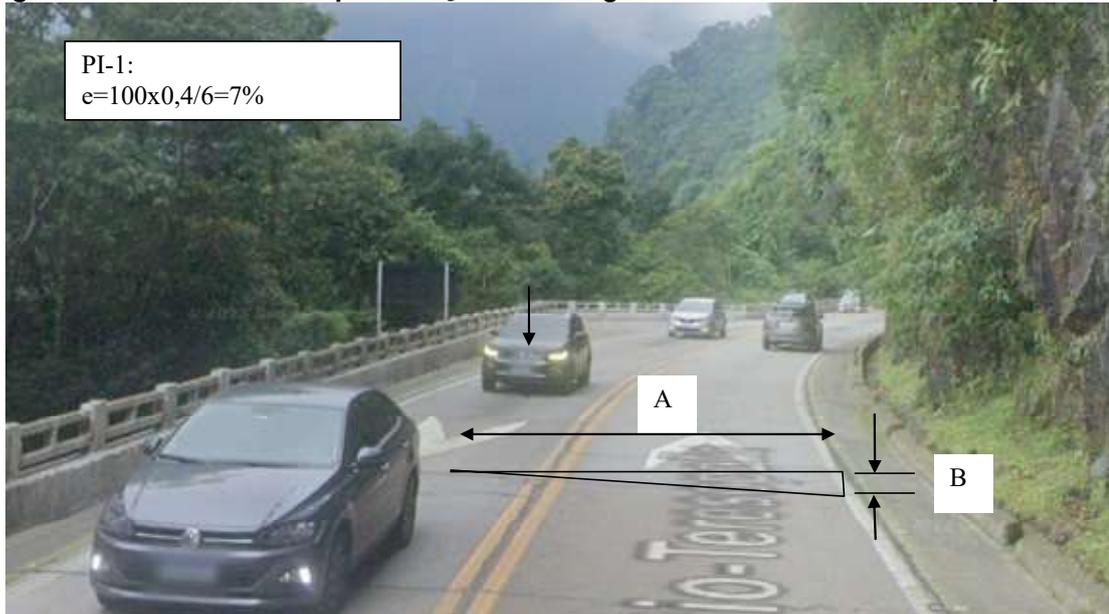
A Tabela M3 apresenta os valores mínimos e máximos das grandezas estudadas no trecho de serra entre Teresópolis e Guapimirim, referentes à Tabela M1.

Figura M3 Traçado em Planta – 1º Segmento do Trecho da BR 116 – PI-1 - Guapimirim/RJ



Fonte: *Google Maps*, adaptado pelo Autor (2023).

Figura M4 Tendência de Superelevação do 1º Segmento - PI-1 da BR 116 – Guapimirim/RJ



Fonte: *Google Street*, adaptado pelo Autor (2023)

Tabela M2 Geom. da BR 116 em Guapimirim – Valores Médios por Quilômetro

Estudo por quilometragem:

km	Ac médio	L médio:	i médio:	R médio:	D médio:	e médio:	IRV _L	IRV _C
(2022)	(°)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)		
89	27	89	-5	300	131	8	8	17
90	34	128	-5	223	102	6	31	34
91	46	162	-6	143	71	5	40	52
92	87	273	-7	81	120	8	38	81
93	60	95	-7	64	59	5	14	58
94	75	147	-6	65	62	8	16	80
95	89	147	-7	79	109	5	20	64
96	56	91	-5	109	91	6	14	52
97	66	139	-6	111	119	6	12	52
98	68	108	-6	100	116	4	12	54
99	87	161	-7	80	113	7	27	66
100	64	115	-5	96	106	6	12	52
101	44	240	-5	90	73	6	28	67
102	107	176	-6	110	204	7	15	52
103	66	110	-5	106	123	3	10	49

Fonte: Do Autor (2023)

Tabela M3 Geom. da BR 116 em Guapimirim – Valores Máximo e Mínimo dos Elementos do Trecho

valores	AC	L	i	R	D	e
	(o)	(m)	(%)	(m)	(m)	(%)
máximo:	144	550	-3,6	410	241	10
mínimo:	8	4	-9,1	27	18	2
média:	65	140	-5,9	109	102	5,9

Fonte: Do Autor (2023)