

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

César Viapiana

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE LIMITE DE
TOMBAMENTO LATERAL ESTÁTICO E MARGEM DE
SEGURANÇA DE VEÍCULOS PESADOS EM CURVAS:
ESTUDO DE CASO DA ERS-122**

Porto Alegre
Agosto 2020

CÉSAR VIAPIANA

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE LIMITE DE
TOMBAMENTO LATERAL ESTÁTICO E MARGEM DE
SEGURANÇA DE VEÍCULOS PESADOS EM CURVAS:
ESTUDO DE CASO DA ERS-122**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Daniel Sergio Presta García

Porto Alegre

Agosto 2020

CÉSAR VIAPIANA

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE LIMITE DE
TOMBAMENTO LATERAL ESTÁTICO E MARGEM DE
SEGURANÇA DE VEÍCULOS PESADOS EM CURVAS:
ESTUDO DE CASO DA ERS-122**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, agosto de 2020.

Prof. Daniel Sergio Presta García
Dr. Pela UFRGS
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Daniel Sergio Presta García (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Afonso dos Santos Senna (UFRGS)
Ph.D. pela University of Leeds

Engº César Luís Andriola (UFRGS)
Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Engº Luís Fernando Finamor (DAER)
Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Engª Alessandra Ribeiro da Silva (DAER)
Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio e Beatriz,
por me possibilitarem cursar esta graduação,
e à minha irmã Gabriela por todo auxílio,
apoio e incentivo durante o curso.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a todos que contribuíram de alguma forma para minha trajetória até aqui. Aos amigos e professores do Colégio São José de Caxias do Sul, em especial ao Prof. Diego Boschetti por todos os ensinamentos e por me despertar a paixão pela física e pela engenharia.

Agradeço ao Prof. Daniel García pela orientação, incentivo, conselhos, e auxílio sempre que necessário durante a realização deste trabalho.

Ao Eng. César Andriola pelos debates e recomendações acerca do trabalho, bem como aos amigos de curso, em especial o Bruno Conte, o Leonardo Grabowski e o Guilherme Carboni pelo companheirismo e auxílio durante toda a graduação.

Ao NORIE pela oportunidade de ser bolsista de iniciação científica, proporcionando experiências de laboratório, realização de pesquisas, publicação de artigo, participação em congresso, e não menos importante, a experiência de poder tocar com a guitarra de concreto durante as ótimas confraternizações.

Ao DAER e ao Eng. Finamor pela oportunidade de estágio, bem como à Eng. Alessandra Ribeiro e ao Comando Rodoviário da Brigada Militar pelos dados fornecidos para a realização do estudo de caso deste trabalho.

Ao Eng. Pavel Šperka pela orientação, troca de experiências e diálogo durante o estágio na *Brno University of Technology*, na República Tcheca, tornando-se um verdadeiro amigo.

Aos irmãos que a vida me deu, Hélio, João Poli, Frederico e Bruno Corrêa por todo incentivo, motivação, amizade e inspiração desde meus 11 anos, colecionando momentos eternos. E à Carol, por estar sempre disposta a auxiliar com as correções de língua inglesa.

À minha companheira de todos os momentos, Fabi, pelo apoio, incentivo e por sempre acreditar na minha capacidade, tornando mais leves todos os desafios enfrentados.

Agradeço imensamente à minha família. Vocês me ensinaram os valores e formaram a base sobre a qual estou construindo minha vida. Sem vocês nada disso seria possível.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a Deus por ter colocado em minha vida pessoas tão especiais que me fazem evoluir diariamente como profissional e ser humano.

Os sábios têm o futuro nas mãos,
enquanto os tolos estão nas mãos do futuro.

Thiago Nigro

RESUMO

Tratando-se de rodovias, um dos assuntos mais pertinentes é a segurança viária. O Brasil é o 4º país do mundo com maior número de vítimas fatais por ano em função de acidentes de trânsito. A presente pesquisa tem o intuito de analisar como os fatores geométricos da via, assim como as características dos veículos, influenciam o Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT) de veículos pesados, bem como a margem de segurança ao tombamento e escorregamento a que esses veículos estão expostos ao trafegarem em curvas horizontais. A fim de aproximar as análises a cenários reais, foi realizado um estudo de caso acerca da curva do km 46+870 da ERS-122, com o auxílio de uma planilha de cálculo. Essa planilha foi desenvolvida para, a partir de parâmetros de entrada, obter-se dados a respeito da segurança geral de veículos pesados. Por meio de uma análise da sensibilidade do método quanto às margens mínimas de segurança proporcionadas nas condições limites de projeto, concluiu-se que as mesmas são insatisfatórias para a maior parte dos cenários reais enfrentados por veículos pesados nas rodovias. Isso evidencia a importância da incorporação da análise do tombamento e escorregamento de veículos pesados em projetos rodoviários, uma vez que as normas de projeto em vigor não garantem adequada margem de segurança contra essas falhas para todas as categorias de veículos. Tornou-se possível, portanto, o desenvolvimento de uma metodologia e obtenção de dados que podem auxiliar na análise do comportamento de veículos pesados e das causas de acidentes nas rodovias brasileiras.

Palavras-chave: SRT, tombamento, escorregamento, veículo pesado, segurança viária.

ABSTRACT

Regarding roadways, road safety is one of the most relevant matters. Brazil is in fourth place among the countries with the highest number of fatalities due to traffic accidents. The research aims to analyze how road geometric factors and vehicle features influence heavy vehicle's Static Rollover Threshold (SRT), as well as safety margin for rollover and slide failure during a cornering maneuver. In order to approximate the analyzes to real scenarios, a case study about the ERS-122 km 46+870 curve was carried out, with the aid of a spreadsheet that provides general safety data for heavy vehicles, from input parameters. Through an analysis of the method sensibility concerning the minimums safety margins provided in the boundary conditions of the project, it was concluded that these margins are unsatisfactory for most real situations faced by heavy vehicles on roadways. It highlights the importance of incorporating the rollover and slide failure analysis in highway projects, since the current project manuals do not ensure adequate safety margins against these failures for all vehicle categories. Therefore, it was possible to develop a methodology and obtain data that can assist in the analysis of the behavior of heavy vehicles and the causes of accidents on Brazilian highways.

Keywords: SRT, rollover, slide, heavy vehicle, road safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forças atuantes sobre o veículo em curva horizontal.....	25
Figura 2 – Modelo para tombamento – veículo bidimensional, rígido e unitário	34
Figura 3 – Faixas de variação do SRT para diferentes categorias de veículos.....	36
Figura 4 – Ensaio de inclinação de mesa.....	39
Figura 5 – Teste dinâmico de tombamento lateral	40
Figura 6 – Fatores intrínsecos redutores do SRT em veículos pesados	41
Figura 7 – Influência da combinação de veículos na amplificação traseira	43
Figura 8 – Efeito <i>Slosh</i> em caminhão tanque durante uma ultrapassagem	44
Figura 9 – Display do RSA desenvolvido pela UMTRI.....	45
Figura 10 – Planilha de cálculo para Cenário 2 do Estudo de Caso: dados de entrada.....	49
Figura 11 – Planilha de cálculo para Cenário 2 do Estudo de Caso: dados de saída	55
Figura 12 – Mapa de localização da curva estudada	56
Figura 13 – Sinalização vertical indicando sobre a periculosidade do trecho.....	57
Figura 14 – Cicatrizes no pavimento provocadas por tombamento de veículos	58
Figura 15 – Sinalizações verticais obstruídas pela vegetação	59
Figura 16 – Fatores de atrito na curva do km 46 da ERS-122.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Velocidades diretrizes para novos traçados em função da classe de projeto e do relevo	22
Quadro 2 – Valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito transversal de projeto	27
Quadro 3 – Raios mínimos em função das taxas máximas de superelevação.....	32
Quadro 4 – Acidentes no período de 01/01/2010 a 31/12/2019 nos km 46 e 47 da ERS-122 .	60
Quadro 5 – Análise da segurança para cada cenário estudado	64
Quadro 6 – Análise da segurança para cada cenário estudado, com $f_{disp} = 0,45$	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atrito lateral máximo disponível para veículos pesados	29
Tabela 2 – Parâmetros de projeto para cada classe e relevo de rodovia.....	48
Tabela 3 – Cenários simulados para tombamento	63

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BPN – *British Pendulum Number* (Número do Pêndulo Britânico)

CG – Centro de Gravidade

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

CRBM – Comando Rodoviário da Brigada Militar

CVC – Combinação de Veículos de Carga

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ERS – Estrada Rio Grande do Sul

EUA – Estados Unidos da América

HS – *Hauteur de Sable* (Altura de Mancha de Areia)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFI - *International Friction Index*

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS

MS – Margem de Segurança

PBT – Peso Bruto Total

PIB – Produto Interno Bruto

PNCT – Plano Nacional de Contagem de Tráfego

PRE – Polícia Rodoviária Estadual

RS – Rio Grande do Sul

RSA – *Roll Stability Advisory* (Sistema de Aviso de Tombamento)

RT – *Rollover Threshold* (Limite de Tombamento Lateral)

SG – Segurança Geral

SG_{VPNA} – Segurança Geral de Veículos Pesados Não Articulados

SG_{SR} – Segurança Geral de Semirreboques/Reboques

SRT – *Static Rollover Threshold* (Limite de Tombamento Lateral Estático)

UMTRI – *University of Michigan Transportation Research Institute*

LISTA DE SÍMBOLOS

α, θ – ângulo da declividade transversal da pista [graus]

\emptyset_T – ângulo da mesa de inclinação [graus]

a_y – aceleração lateral [m/s²]

a_{yat} – aceleração lateral atuante no veículo [g]

a_{yS} – aceleração lateral simulada [g]

b_r – fator de calibração [adim.]

b_s – fator de sobresterçamento [m/m]

b_v – fator veicular/de ajustamento do tipo de veículo [adimensional]

e – superelevação (tg α) [m/m]

e_{max} – máxima taxa de superelevação adotada [m/m]

f – coeficiente de atrito transversal/lateral [adimensional]

f_{dem} – fator de atrito lateral demandado [adimensional]

f_{disp} – fator de atrito lateral disponível [adim.]

$f_{disp\ min}$ – fator de atrito lateral mínimo disponível [adimensional]

f_{max} – máximo coeficiente de atrito transversal admissível de projeto [adim.]

f_{medio} – fator de atrito lateral médio [adimensional]

$f_{x,max,sk}$ – fator de atrito longitudinal dinâmico máximo disponível [adim.]

$f_{y,max,sl}$ – fator de atrito lateral estático máximo disponível [adim.]

F_{at} – força de atrito [N]

F_c – força centrífuga [N]

g – aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

h – altura do centro de gravidade do veículo em relação ao solo [m]

h_{base} – altura da base de carga em relação ao solo [m]

h_c – altura do centro de gravidade da carga [m]

h_{total} – altura total do reboque em relação ao solo [m]

h_v – altura do centro de gravidade do veículo [m]

m – massa do veículo [kg]

m_c – massa da carga [tonelada]

m_v – massa do veículo [tonelada]

M_R – momento de resistência [N.m]

M_T – momento de tombamento [N.m]

MS_E – margem de segurança ao escorregamento lateral [g]

MS_T – margem de segurança ao tombamento lateral [g]

N – força de apoio/normal [N]

P – Peso do veículo [N]

R – raio da curva [m]

R_{min} – raio mínimo da curva [m]

$Rampa_{max}$ – rampa máxima permitida de projeto [m/m]

SRT_e – limite de tombamento lateral estático com superelevação da via [g]

SRT_{geom} – limite de tombamento lateral estático em função da geometria veicular [g]

t – bitola do veículo [m]

v – velocidade do veículo [m/s]

V_{dir}, V_P – velocidade diretriz/de projeto [km/h]

V_E – velocidade limite de escorregamento lateral [km/h]

V_T – velocidade limite de tombamento lateral [km/h]

W – peso do veículo [N]

SUMÁRIO

RESUMO	18
ABSTRACT	18
1 Introdução	19
2 Referencial Teórico	21
2.1 Elementos de Projeto	22
2.1.1 Velocidade Diretriz.....	22
2.1.2 Veículo de Projeto	22
2.1.3 Alinhamento Horizontal	24
2.1.3.1 Atrito Transversal	26
2.1.3.2 Superelevação	31
2.2 Parâmetros para Análise da Segurança ao Tombamento.....	32
2.2.1 O Fenômeno do Tombamento	33
2.2.2 O Limite de Tombamento Lateral Estático	34
2.2.3 Testes para Determinação do Limite de Tombamento Lateral Real	38
2.2.4 Fatores que Influenciam no Tombamento	41
2.2.4.1 Fatores Intrínsecos ao Veículo	41
2.2.4.2 Fatores Extrínsecos ao Veículo – Via e Condutor	42
2.2.4.3 Amplificação Traseira	43
2.2.4.4 Efeito Slosh	44
2.2.5 Dispositivos de Segurança ao Tombamento.....	45
3 Metodologia	46
3.1 Veículos Analisados	46
3.2 Parâmetros da Via.....	48
3.3 Margem de Segurança ao Escorregamento.....	49
3.4 Margem de Segurança ao Tombamento	50
3.5 Segurança Geral.....	53
4 Estudo de Caso	55
4.1 A Rodovia ERS-122 e a Curva do km 46+870.....	55
4.2 Simulações e Resultados.....	62
5 Análise de Sensibilidade do Método Utilizado	66
5.1 Segurança ao Escorregamento	66
5.2 Segurança ao Tombamento.....	67
6 Discussão dos Resultados	68
7 Considerações Finais	70
Referências	71
APÊNDICE	74
ANEXO A	81
ANEXO B	84

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE LIMITE DE TOMBAMENTO LATERAL ESTÁTICO E MARGEM DE SEGURANÇA DE VEÍCULOS PESADOS EM CURVAS: ESTUDO DE CASO DA ERS-122

VIAPIANA, César; GARCÍA, Daniel S. P.

RESUMO

Tratando-se de rodovias, um dos assuntos mais pertinentes é a segurança viária. O Brasil é o 4º país do mundo com maior número de vítimas fatais por ano em função de acidentes de trânsito. A presente pesquisa tem o intuito de analisar como os fatores geométricos da via, assim como as características dos veículos, influenciam o Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT) de veículos pesados, bem como a margem de segurança ao tombamento e escorregamento a que esses veículos estão expostos ao trafegarem em curvas horizontais. A fim de aproximar as análises a cenários reais, foi realizado um estudo de caso acerca da curva do km 46+870 da ERS-122, com o auxílio de uma planilha de cálculo. Essa planilha foi desenvolvida para, a partir de parâmetros de entrada, obter-se dados a respeito da segurança geral de veículos pesados. Por meio de uma análise da sensibilidade do método quanto às margens mínimas de segurança proporcionadas nas condições limites de projeto, concluiu-se que as mesmas são insatisfatórias para a maior parte dos cenários reais enfrentados por veículos pesados nas rodovias. Isso evidencia a importância da incorporação da análise do tombamento e escorregamento de veículos pesados em projetos rodoviários, uma vez que as normas de projeto em vigor não garantem adequada margem de segurança contra essas falhas para todas as categorias de veículos. Tornou-se possível, portanto, o desenvolvimento de uma metodologia e obtenção de dados que podem auxiliar na análise do comportamento de veículos pesados e das causas de acidentes nas rodovias brasileiras.

Palavras-chave: SRT, tombamento, escorregamento, veículo pesado, segurança viária.

ABSTRACT

Regarding roadways, road safety is one of the most relevant matters. Brazil is in fourth place among the countries with the highest number of fatalities due to traffic accidents. The research aims to analyze how road geometric factors and vehicle features influence heavy vehicle's Static Rollover Threshold (SRT), as well as safety margin for rollover and slide failure during a cornering maneuver. In order to approximate the analyzes to real scenarios, a case study about the ERS-122 km 46+870 curve was carried out, with the aid of a spreadsheet that provides general safety data for heavy vehicles, from input parameters. Through an analysis of the method sensibility concerning the minimums safety margins provided in the boundary conditions of the project, it was concluded that these margins are unsatisfactory for most real situations faced by heavy vehicles on roadways. It highlights the importance of incorporating the rollover and slide failure analysis in highway projects, since the current project manuals do not ensure adequate safety margins against these failures for all vehicle categories. Therefore, it was possible to develop a methodology and obtain data that can assist in the analysis of the behavior of heavy vehicles and the causes of accidents on Brazilian highways.

Keywords: SRT, rollover, slide, heavy vehicle, road safety.

1 Introdução

Tratando-se da movimentação de pessoas e mercadorias, o sistema rodoviário é o modal mais utilizado do mundo, visto que geralmente está presente em ao menos uma etapa dessa movimentação. É por meio do transporte terrestre que a maior parte das movimentações de curtas a médias distâncias são feitas, bem como o início e/ou fim de uma viagem realizada por modais ferroviários, aéreos e aquaviários.

Tendo em vista a importância das rodovias, a segurança viária é um tema fundamental. O Brasil é o 4º país do mundo com maior número de vítimas fatais por ano em função de acidentes de trânsito (DEARO, 2014). Segundo a *World Health Organization* (2018), a partir de levantamentos realizados entre 2000 e 2016, o número de mortes no trânsito continua aumentando, permanecendo em um patamar inaceitavelmente alto, com estimativa, em 2016, de 1,35 milhão de pessoas vitimadas a cada ano no mundo. Ainda, lesões no trânsito, atualmente, são a principal causa de morte de crianças e jovens entre 5 e 29 anos, e a oitava maior causa para todas as idades, a frente de doenças como HIV/AIDS e tuberculose.

Segundo dados do Relatório de Acidentes de Trânsito nas Rodovias Federais Brasileiras, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2015), acidentes em transportes terrestres no Brasil são responsáveis por aproximadamente 43 mil vítimas fatais a cada ano, representando uma das principais causas de morte no país. Dessas, cerca de 20% ocorrem em rodovias federais, nas quais 26 mil pessoas se ferem gravemente por ano. Em termos monetários, os cerca de 170 mil acidentes ocorridos apenas em rodovias federais no país em 2014, entre despesas médicas, perda de produção e danos materiais, custaram R\$ 12,3 bilhões à sociedade, um valor correspondente a 0,2% do PIB brasileiro daquele ano, que foi de R\$ 5,521 trilhões.

O mesmo relatório (Ibid., p.33), com base nos dados obtidos em 2014, concluiu que aproximadamente 30% dos acidentes em rodovias federais teve ao menos um caminhão envolvido, e os acidentes que estes veículos estiveram envolvidos ocasionaram 43% das mortes. Do total de acidentes nas rodovias federais, o tombamento correspondeu à 4% e os capotamentos representaram 4,4%.

Com o intuito de reduzir os acidentes de trânsito, a Assembleia Geral das Nações Unidas desenvolveu o *Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020* (Plano Global para a Década de Ação em prol da Segurança Viária 2011-2020, em tradução livre), lançado em maio de 2011. Esse documento é uma ferramenta de suporte para o desenvolvimento de planos de ação nacionais e locais, ao mesmo tempo que serve de base

para atividades globais coordenadas. Nele são indicadas diretrizes a serem adotadas a fim de aumentar a segurança no trânsito, como o desenvolvimento de estratégias coordenadas por uma agência líder estabelecida, regulamentações de segurança em veículos, e aumento da conscientização a respeito dos fatores de risco para a segurança viária por meio de campanhas sociais (UNITED NATIONS, 2011).

Quanto aos fatores responsáveis pelos acidentes viários, Treat et al. (1979) resume-os em três grandes grupos: motorista, veículo e rodovia. Desses, a rodovia é o fator mais independente do usuário, devendo esta ser o mais segura possível, estando em bom estado de conservação, bem sinalizada e, principalmente, bem projetada, a fim de reduzir a parcela do risco associado a esse grupo. Os parâmetros das rodovias, como raio de curvatura, superelevação e atrito do pavimento, são itens chave para a segurança. Conforme Radimsky et al. (2016), a maior parte dos acidentes em rodovias acontecem em trechos retilíneos, porém são nas curvas que os acidentes mais severos ocorrem.

Tratando-se de rodovias construídas há muitos anos, frequentemente há a ocorrência de perda de projeto original, construção diferente da obra projetada, e, em alguns casos, até a inexistência de projeto executivo. É corriqueira a necessidade de modificações e adequações de projeto no momento de sua execução, porém a falta do *As-Built* – documento no qual ficam registradas todas as alterações ocorridas e a versão final implantada do projeto – muitas vezes gera incompatibilidade entre o que consta no projeto e o que está executado.

Aliado a isso, há problemas intrínsecos relacionados aos veículos, como excesso de velocidade, excesso de carga, pneus gastos ou mal calibrados, sistema de suspensão precário, baixa rigidez estrutural, altura de carga acima do permitido, entre outros. Esses fatores influenciam diretamente o tombamento lateral do veículo, e conseqüentemente, a margem de segurança ao trafegar em uma rodovia.

Partindo-se da análise das características de rodovias e dos fatores veiculares determinantes, este trabalho tem o objetivo de estudar o limite de tombamento lateral estático (SRT) em função de diferentes condições de veículos e rodovias, a fim de tornar possível a determinação de parâmetros que mensurem a segurança a que estes veículos estariam submetidos ao trafegarem em curvas horizontais. De forma complementar, também será avaliada a margem de segurança ao escorregamento, possibilitando uma análise da segurança geral do veículo em cada cenário.

A partir da pesquisa e estudo da literatura disponível, desenvolveu-se uma metodologia e planilha de cálculo automatizada que, por meio de parâmetros de projeto e dados reais da rodovia e veículo, possibilita a análise das velocidades e margens de

segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados não articulados e semirreboques/reboques durante o contorno de uma curva. Assim, pode-se simular inúmeros cenários, contribuindo para uma rápida e dinâmica análise da segurança ao tombamento de veículos, fator não incorporado nas normas de projetos rodoviários atuais, as quais restringem-se à análise do escorregamento, com margens baseadas no limite de conforto dos usuários da via.

A fim de aproximar o trabalho a situações reais enfrentadas nas rodovias, o estudo de caso foi realizado com base em uma das curvas com maior acidentalidade da rodovia ERS122 – km 47+070 ao km 46+670 –, na faixa de descida da serra, sentido Farroupilha – São Vendelino. Optou-se por essa curva em especial por suas características geométricas, quantidade e severidade dos acidentes que nela ocorrem, bem como pela importância do trecho e da rodovia para o Estado do Rio Grande do Sul. Fez-se também uma análise das margens mínimas de segurança ao tombamento e escorregamento lateral de veículos pesados, utilizando-se os parâmetros limite adotados pelo Manual do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1999), hoje denominado Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT.

Desta forma, o Capítulo 2 a seguir apresenta, por meio de revisões e pesquisas na literatura, os conceitos técnicos acerca dos elementos de projeto de rodovias, juntamente com o estudo do fenômeno do tombamento, essenciais para o presente trabalho. No Capítulo 3, é desenvolvida a metodologia utilizada para avaliar a segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados, a qual fornece resultados importantes obtidos com o estudo de caso do Capítulo 4 e com a análise de sensibilidade do método, no Capítulo 5. Tais resultados possibilitaram diversas conclusões acerca das margens de segurança atualmente praticadas nas rodovias brasileiras, discutidas no Capítulo 6, bem como recomendações para trabalhos futuros, no Capítulo 7.

2 Referencial Teórico

Para a completa compreensão deste trabalho, alguns conceitos devem ser apresentados. Nesse sentido, a seção 2.1 apresentará os elementos de projeto de rodovias, enquanto a seção 2.2 apresentará os parâmetros necessários para a análise da segurança ao tombamento. Com os conceitos apresentados, será possível detalhar a metodologia empregada e avaliar os resultados obtidos com o estudo de caso.

2.1 Elementos de Projeto

Ao definir o traçado de uma rodovia, existem vários elementos que devem ser analisados visando aumentar a segurança e conforto dos condutores. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1999) indica como elementos de projeto: velocidade diretriz; veículos de projeto; distâncias de visibilidade; alinhamento horizontal; alinhamento vertical; e elementos da seção transversal. Em função da relevância para este estudo, serão expostos os elementos de velocidade diretriz, veículo de projeto e alinhamento horizontal.

2.1.1 Velocidade Diretriz

A velocidade diretriz, ou de projeto, condiciona os parâmetros da via, como a curvatura e a superelevação. O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999, p.41), define-a como:

A maior velocidade com que pode ser percorrido um trecho viário cuja superfície de rolamento apresente condições normais de rugosidade e ondulações, com segurança e em condições aceitáveis de conforto, mesmo com o pavimento molhado, quando o veículo estiver submetido apenas às limitações impostas pelas características geométricas, sem influência do tráfego.

A velocidade varia em função da classe de projeto da rodovia e do relevo em que a mesma está inserida, conforme apresentado no Quadro 1. Desta forma, a velocidade diretriz será tão maior quanto mais baixa for a classe da rodovia – menores classes comportam maiores fluxos, possuem mais faixas de rolamento, maiores larguras e garantem maior segurança. O mesmo ocorre em função do relevo, para o qual quanto mais plano for, maior será a velocidade diretriz recomendada.

Quadro 1 – Velocidades diretrizes para novos traçados em função da classe de projeto e do relevo

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

(fonte: DNER, 1999, p.42)

2.1.2 Veículo de Projeto

Características físicas dos veículos e proporção entre vários tipos de veículos condicionam diversos aspectos geométricos e estruturais de uma via, como: (i) influência da

largura do veículo na largura da pista, dos acostamentos e dos ramos; (ii) influência da distância entre eixos na superlargura e raios mínimos internos das pistas; (iii) influência do comprimento do veículo na extensão das faixas de espera e na capacidade da rodovia; (iv) relação entre peso/potência e o valor da rampa máxima admissível; (v) relação entre peso bruto, configuração dos eixos e posição do centro de gravidade, influenciando o dimensionamento e configuração do pavimento e defensas; (vi) condicionamento do gabarito vertical sob redes aéreas, viadutos, túneis e sinalizações verticais em função da altura veicular admissível (DNER, 1999).

A influência das características físicas dos veículos é ampliada quando se considera a natureza mista da frota brasileira. Levantamentos realizados para o Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) de 1996 mostraram que a frota de veículos em tráfego nas rodovias rurais e travessias urbanas era composta por 56,2% de automóveis, 7,6% de ônibus e 36,2% de caminhões (DNIT, 2010).

Para a caracterização dos veículos de projeto, o DNIT (2010, p.177), no Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas, faz o uso das categorias definidas pelo manual americano desenvolvido pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) de 1994, bem como as composições da Portaria nº 86/2006 do Departamento Nacional de Trânsito para veículos de carga de grandes dimensões compostos de mais de uma unidade, designados como CVC (combinação de veículos de carga). As categorias são:

VP - Representa os veículos leves, física e operacionalmente assimiláveis ao automóvel, incluindo minivans, vans, utilitários, pick-ups e similares.

CO - Representa os veículos comerciais rígidos, não articulados, de menores dimensões. Abrangem os caminhões e ônibus convencionais, de dois eixos e quatro a seis rodas.

O - Representa os veículos comerciais rígidos, não articulados, de maiores dimensões. Entre estes, se incluem os ônibus urbanos longos, bem como caminhões com três eixos (trucão), de maiores dimensões que o veículo CO básico.

OR - Representa os ônibus de longo percurso (rodoviário) e de turismo. Seu comprimento é o máximo permitido para veículos não articulados e se aproxima do limite máximo legal admissível para ônibus não articulados que possuam 3º eixo de apoio direcional.

CA - Representa os veículos de carga articulados, compostos de uma unidade tratora simples (cavalo mecânico) com 2 eixos, tracionando um semi-reboque de 3 eixos. O modelo representativo é o veículo conhecido como Carreta. Essa categoria inclui, também, o modelo conhecido como Vanderléia, de mesmo comprimento, composto de uma unidade tratora simples com 3 eixos, tracionando um semi-reboque de 3 eixos.

BT7 - Representa os veículos de carga articulados, compostos de um cavalo mecânico com 3 eixos, tracionando, por meio de duas articulações,

2 semi-reboques de 2 eixos. O modelo representativo é o veículo conhecido como Bitrem de 7 eixos, com comprimento total de 19,80 metros.

CG - Representa os veículos especiais para transporte de automóveis, vans, ônibus, caminhões e similares. O modelo representativo é o veículo conhecido como Cegonheiro ou CTV – Combinação de Transporte de Veículos, compostos de um cavalo mecânico com 2 eixos, tracionando um semirreboque de 2 eixos.

BT9 - Representa os veículos de carga articulados, compostos de um cavalo mecânico com 3 eixos, tracionando, por meio de duas articulações, 2 semi-reboques de 3 eixos. O modelo representativo é o veículo conhecido como Bitrem de 9 eixos, com comprimento total de 25 metros. Abrange também o veículo Rodotrem, composto de um cavalo mecânico com 3 eixos, tracionando, por meio de três articulações, 2 semi-reboques de 2 eixos com dolly intermediário de 2 eixos, com comprimento total de 25 metros.

BTL - Representa os veículos de carga articulados, compostos de um cavalo mecânico com 3 eixos, tracionando, por meio de duas articulações, 2 semi-reboques de 3 eixos. O modelo representativo é o veículo conhecido como Bitrem de 9 eixos, com comprimento total de 30 metros. Abrange, também, o veículo Rodotrem de 30 metros.

A escolha do veículo de projeto a ser adotado, portanto, deve levar em consideração a característica do tráfego da região (turística, escoamento de produção, áreas urbanas, entre outras), uma vez que para cada situação há diferentes veículos predominantes nas vias. Da mesma forma, deve garantir condições operacionais iguais ou mais favoráveis para veículos de dimensões iguais ou menores, a fim de que os veículos com características mais desfavoráveis que o de projeto, os quais representam uma parcela muito pequena do tráfego, continuem possibilitados de trafegar, estando sujeitos a condições operacionais inferiores às mínimas estabelecidas apenas em algumas situações. Em função da considerável participação nas rodovias brasileiras, o veículo de projeto mais adotado é o tipo CO (DNIT, 2010).

2.1.3 Alinhamento Horizontal

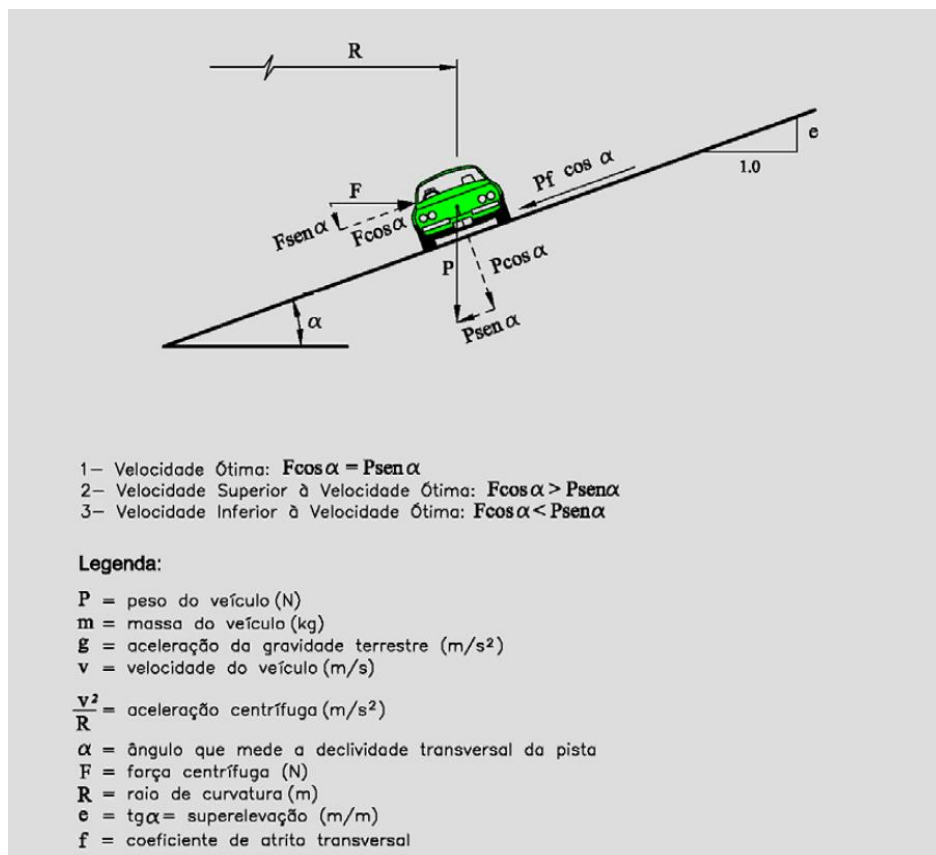
O traçado e a geometria da curva são parâmetros determinantes para este estudo. Segundo a AASHTO (2001), o projeto de curvas horizontais deve basear-se na relação adequada entre velocidade diretriz e curvatura, e a relação conjunta dessas com a superelevação e atrito transversal. Nesse sentido, uma análise das forças atuantes nos veículos durante a realização de curvas é necessária, seguida de um detalhamento dos conceitos relacionados ao atrito e à superelevação, nas seções 2.1.3.1 e 2.1.3.2, respectivamente.

Para desenvolver uma trajetória curvilínea, a atuação de uma aceleração centrípeta na direção do centro de curvatura se faz necessária, uma vez que um corpo em movimento

tende a manter uma trajetória retilínea em decorrência da inércia de sua massa. Essa aceleração pode ser sustentada por uma componente do peso do veículo relacionada à superelevação, pelo atrito lateral desenvolvido entre pneu e pavimento, ou uma combinação de ambos. Para uma dada superelevação, a velocidade que não desenvolve esse atrito é chamada de velocidade ótima. Analogamente, dada uma velocidade de projeto, as taxas de superelevação que evitam a ocorrência de atrito transversal entre pneu e pavimento para diferentes raios são denominadas superelevações ótimas. Nos casos em que somente a superelevação não é suficiente, há a necessidade de realizar esforços com o volante do veículo a fim de desenvolver um atrito lateral entre pneu e pista, mantendo o veículo na trajetória curvilínea desejada (DNIT, 2005).

As forças atuantes sobre um veículo em trecho curvo estão representadas na Figura 1. Uma parcela do peso próprio gerada pela declividade transversal da pista (a superelevação), juntamente com a força de atrito transversal, contribui para manter o veículo dentro da curva, equilibrando a fictícia força centrífuga que atua para o lado externo, representando a tendência inercial do veículo em manter sua trajetória retilínea.

Figura 1 – Forças atuantes sobre o veículo em curva horizontal



(fonte: DNIT, 2005, p.62)

Para a condição limite de equilíbrio estático, o equilíbrio de forças atuantes é dado da seguinte maneira, a fim de se obter o raio mínimo:

$$P \cdot \sin \alpha + f \cdot (P \cdot \cos \alpha + F \cdot \sin \alpha) = F \cdot \cos \alpha$$

Sendo ($P = mg$), ($F = mv^2/R$) e dividindo-se por ($\cos \alpha$), tem-se:

$$mg \cdot \tan \alpha + f \left(mg + \tan \alpha \cdot \frac{mv^2}{R} \right) = \frac{mv^2}{R}$$

Dividindo por (m), sendo ($\tan \alpha = e$) e deixando em evidência o termo (v^2/gR) tem-se a equação básica para veículos em curva (AASHTO, 2001, p.131):

$$g \cdot e + f \cdot g + f \cdot e \cdot \frac{v^2}{R} = \frac{v^2}{R}$$

$$g \cdot (e + f) = \frac{v^2}{R} \cdot (1 - f \cdot e)$$

$$\frac{(e + f)}{(1 - f \cdot e)} = \frac{v^2}{gR}$$

Em função do termo ($f \cdot e$) ser de segunda ordem, e por isso sempre muito pequeno, normalmente é omitido nos projetos rodoviários (AASHTO, 2001, p.133), resultando em:

$$(e + f) = \frac{v^2}{gR}$$

Na condição limite de escorregamento, com fator de atrito máximo e superelevação máxima, tem-se o raio mínimo da curva horizontal, para (v) em km/h e (g) = 9,8 m/s², pela Equação 1 (DNER, 1999, p.71):

$$R_{min} = \frac{V^2}{127 \cdot (e_{max} + f_{max})} \quad (1)$$

Em que:

R_{min} = raio mínimo da curva [m]

V = velocidade diretriz [km/h]

e_{max} = máxima taxa de superelevação adotada [m/m]

f_{max} = máximo coeficiente de atrito transversal admissível entre pneu e pavimento [adim.]

2.1.3.1 Atrito Transversal

O atrito lateral entre pneu e superfície da rodovia é o responsável pela geração da aceleração centrípeta necessária para a realização de curvas quando não há superelevação, e parcialmente responsável quando há. Assim, deve ser corretamente dimensionado em função da velocidade diretriz (DNIT, 2005). O atrito fornecido, ou disponível, é uma função das

micro e macrotexturas da estrada. A microtextura refere-se à rugosidade da superfície de cada partícula de agregado, enquanto a macrotextura é a qualidade rugosa da superfície definida pelas propriedades da mistura de asfalto (tamanho, forma, graduação dos agregados) ou pelo método de acabamento/texturização de um pavimento de concreto (LUTZ, 2013, p.34).

Segundo o DNIT (2010, p.237), o valor do coeficiente de atrito transversal disponível pelo pavimento varia com a velocidade no intervalo de 0,50, para 30 km/h, a 0,35, para 100 km/h, para o caso de pneus novos e pavimento de concreto em bom estado, molhado. Esses valores são inferiores para pavimentos menos rugosos e pneus lisos, correspondendo às afirmações de Lamm et al. (1991, p.14), de que o valor do coeficiente de atrito disponível e a aderência na interface pneu-pavimento são consideravelmente influenciados pela condição da superfície do pavimento e a presença ou ausência de água, bem como pelo tipo, condição e pressão de inflação dos pneus.

As curvas não devem, entretanto, ser projetadas com base no máximo atrito lateral disponível. A parcela do atrito lateral que pode ser usada no projeto das curvas, com conforto e segurança, é função do grau de desconforto provocado pela ação da força centrífuga. Para velocidades baixas, os motoristas são mais tolerantes com o desconforto, permitindo a adoção de um maior coeficiente de atrito para o projeto de curvas (DNIT, 2010, p.237). O DNIT (2005, p.61) comenta que altura do centro de gravidade e a estabilidade dos veículos também devem ser consideradas, apesar do desconforto ser o que condiciona o atrito transversal aceitável.

Com isso, os valores dos coeficientes de atrito transversal máximos admissíveis para projeto, a serem empregados para determinar os raios mínimos em diferentes velocidades diretrizes, foram determinados como apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores máximos admissíveis de coeficientes de atrito transversal de projeto

Velocidade diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Coeficiente de atrito transversal $f_{máx}$	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11

(fonte: DNER, 1999, p.71)

Como há mudanças de circunstâncias ao longo de uma rodovia, um nível de atrito exclusivo que defina o limite entre seguro e potencialmente inseguro é difícil de ser determinado. O atrito disponível deve ser definido com base na demanda de atrito de cada seção e é indispensável que exceda, a todo momento, o atrito demandado. Quanto menor for

a margem, ou seja, baixos valores de atrito ofertado e altos valores de atrito demandado (provenientes de altas velocidades, baixa superelevação, e raios pequenos), maior será o desconforto e a insegurança (PASSOS, 2019).

Trazendo uma abordagem mais direcionada ao comportamento de veículos de carga, Bonneson (2000, p.91) afirma que ao atrito disponível para realizar uma curva é mais precisamente referido como o atrito lateral de pico provido pela interface pneu-pavimento sobre uma condição de mínimo deslizamento (estática). Quando o atrito lateral demandado excede o atrito estático disponível o veículo irá escorregar. O *Green Book* não informa os fatores de atrito estáticos disponíveis, mas sim os fatores de atrito para derrapagem longitudinal de roda travada, representando uma condição de máximo deslizamento (dinâmica), na qual o pneu se move em relação à superfície do pavimento.

Neste ponto, é válido comentar a respeito do termo “escorregamento” e por que é a terminologia empregada neste trabalho. Bonneson (2000, p.91) refere-se à falha por escorregamento como *slide failure*, por tratar do atrito estático, indicando que quando o atrito demandado pelo veículo excede o fornecido pelo pavimento, o veículo irá deslizar lateralmente para fora da pista (“*slide off the roadway*”). E usa o termo “derrapagem” para se referir ao deslizamento longitudinal em situação de roda travada (“*locked-wheel, forward skid*”), por tratar do atrito dinâmico. Apesar do termo “derrapagem” ser amplamente utilizado como o fenômeno de um veículo deslizar de modo incontrolável, adotou-se a nomenclatura “escorregamento”, seguindo a justificativa anterior.

Para estimar o atrito lateral disponível para veículos pesados, o autor baseou-se na Equação 2 desenvolvida por Olson et al. (1984 apud BONNESON, 2000, p.91) que relaciona o fator de atrito lateral estático máximo disponível com o fator de atrito longitudinal dinâmico máximo disponível, tal como segue:

$$f_{y,max,sl} = 1,01f_{x,max,sk} \quad (2)$$

Em que:

$f_{y,max,sl}$ = fator de atrito lateral estático máximo disponível [adim.]

$f_{x,max,sk}$ = fator de atrito longitudinal dinâmico máximo disponível [adim.]

Baseado nos valores médios para pavimento molhado dos fatores de atrito longitudinal dinâmico disponíveis, indicados nas Figuras III-1A e III-1B da versão de 1994 do *Green Book* (AASHTO, 2001), o autor (Ibid., p.92) elaborou a Tabela 1. Dessa forma, obtiveram-se os valores médios dos fatores de atrito lateral máximos para falha por

escorregamento lateral de veículos pesados. Bonneson (2000, p.91) afirma, ainda, que estes valores se comparam favoravelmente com os medidos por Wehner (1965, relatado por Lamm, 1984) em rodovias alemãs.

Tabela 1 – Atrito lateral máximo disponível para veículos pesados

Velocidade de Projeto (km/h)	Fator de Atrito Longitudinal Máximo Disponível ($f_{x,max,sk}$)	Fator de Atrito Lateral Máximo Disponível ($f_{y,max,sl}$)
30	0,53	0,54
40	0,48	0,49
50	0,44	0,45
60	0,40	0,41
70	0,36	0,37
80	0,34	0,35
90	0,33	0,33
100	0,31	0,31
110	0,30	0,30
120	0,29	0,29

(fonte: Adaptado de BONNESON, 2000, p.92)

Dando prosseguimento aos parâmetros, para a determinação do atrito demandado pelos veículos pesados, Bonneson (2000, p.90) baseia-se na clássica Equação 1, explicitando f ao invés de R , conforme a Equação 3:

$$f = \frac{v^2}{gR} - e \quad (3)$$

O autor comenta (Ibid.), que essa equação é baseada na representação do veículo como um “ponto de massa”, assumindo-se que as forças atuam no centro de gravidade, negligenciando a distribuição das mesmas em cada pneu. Desta forma, diferenças nos tipos de veículos (automóveis compactos, grandes caminhões) não são explicitamente reconhecidas pelo modelo. Entretanto, o atrito demandado previsto pela Equação 3 oferece um meio interessante de entender a escolha da velocidade em função da geometria da curva, e é aproximadamente igual à aceleração lateral sentida pelo motorista.

Bonneson (2000, p.91), portanto, adota dois fatores adicionais que afetam a demanda por atrito lateral. O primeiro é o fator veicular (b_v), baseado no estudo de MacAdam et al. (1985, apud BONNESON, 2000), o qual indicou que o atrito lateral demandado por veículos pesados excede em cerca de 10% o estimado pela Equação 3, devido à distribuição não uniforme das solicitações de atrito lateral nos diversos pneus do veículo.

O segundo trata do sobresterçamento (b_s) – a diferença entre o raio crítico da manobra em curva e o valor do raio geométrico da curva. Estudos de Glennon e Weaver (1972, apud BONNESON, 2000) concluíram que o raio de uma curva é 1,1 a 1,5 vezes maior que o raio de trajetória em um ponto crítico ao longo da curva. Esses dados corroboram os relatados por MacAdam et al. (1985, apud BONNESON, 2000), de que o atrito lateral demandado é 15% maior que o previsto pela Equação 3 em função das “flutuações de direção” ao longo da curva.

Ocorre que os modelos de escorregamento do *Green Book* (AASHTO, 2001), DNER (1999) e DNIT (2005) assumem que o raio da trajetória desenvolvida pelo veículo é idêntico ao raio geométrico da curva, ignorando o efeito do sobresterçamento (correção da trajetória em um ponto crítico), o qual aumenta a demanda por atrito, consumindo parte do atrito lateral máximo disponível. Outro motivo pertinente para a inclusão do fator de sobresterçamento na análise de veículos pesados é a necessidade de caminhões mais largos e longos, que possuem grande arraste, retardarem o esterçamento na entrada de curvas, a fim de impedir que os pneus internos à curva dos últimos eixos traseiros saiam da pista (EJZENBERG, 2009).

Desta forma, para estimar com maior acurácia o fator de atrito lateral máximo demandado por veículos pesado em curvas, Bonneson (2000, p.91) define a Equação 4:

$$f_{dem} = b_v \left(b_s \frac{v^2}{gR} - e \right) \quad (4)$$

Em que:

f_{dem} = fator de atrito lateral demandado [adim.]

b_v = fator de ajustamento do tipo de veículo (1,1 para veículos pesados) [adim.]

b_s = fator de sobresterçamento ($R_{curva}/R_{trajetória} \approx 1,15$) [m/m]

Adotando-se (v) em km/h, (g) = 9,8 m/s², (b_v) = 1,1 e (b_s) = 1,15, tem-se a Equação 5:

$$f_{dem} = 1,1 \left(1,15 \cdot \frac{v^2}{127R} - e \right) \quad (5)$$

Em que:

f_{dem} = fator de atrito lateral demandado [adim.]

v = velocidade do veículo [km/h]

R = raio da curva [m]

e = superelevação na curva [m/m]

2.1.3.2 Superelevação

Como previamente exposto, a superelevação é a declividade transversal da pista com caimento orientado para o lado interno da curva a fim de compensar a força centrífuga. Na Figura 1, é representada por “ e ”, usualmente expressa em porcentagem, correspondendo à tangente do ângulo “ α ”.

Nos trechos em tangente a pista costuma possuir uma inclinação transversal, do eixo para os bordos, de cerca de 2%, a fim de facilitar a drenagem das águas pluviais, sendo, portando, o valor mínimo de superelevação admissível tanto para trechos retilíneos como curvos. Em contrapartida, os valores máximos são definidos levando em consideração diversos fatores, como condições de tráfego lento, velocidade diretriz e razões econômicas. O Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999, p.98) apresenta os valores máximos admissíveis para a taxa de superelevação, utilizados quando o raio mínimo é empregado:

12% - A taxa máxima prática admissível para a superelevação de projetos rodoviários é de 12%. Seu emprego deve ser limitado aos casos de melhorias e correção de situações perigosas existentes sem alteração dos raios em planta (por economia ou impossibilidade). Deverá ser verificada a incidência de veículos lentos, já que para esses o aumento da superelevação será contraindicado. No caso de projetos novos deve-se procurar aumentar os raios e não a superelevação. Para duplicação com aproveitamento de pista existente sem alterações, cada sentido pode ser atendido separadamente, se necessário.

10% - Próprio para rodovias de padrão elevado, onde as condições topográficas, geométricas e de atrito transversal e os volumes de tráfego favoreçam elevadas velocidades e fluxo ininterrupto. Adotar para rodovias de Classe 0 em geral e Classe I em regiões planas e onduladas.

8% - Em projetos de rodovias de padrão intermediário ou de rodovias de elevado padrão sujeitas a fatores (geralmente topográficos) que reduzam a velocidade média. Adotar para Classe I em região montanhosa e rodovias das demais classes de projeto em geral.

6% - Em projetos condicionados por urbanização adjacente e frequentes interseções, que provocam redução da velocidade média.

4% - Em situações extremas, com intensa ocupação do solo adjacente e reduzida flexibilidade para variar as declividades transversais da pista, sem vias marginais.

Para raios acima do mínimo não há a necessidade de manter a superelevação máxima, uma vez que a aceleração centrípeta é menor. Com isso, o Manual do DNER (1999, p.99) recomenda que haja uma transição gradual da taxa de superelevação até que a mínima admissível (usualmente 2%) seja atingida. Para tanto, recomenda aplicar a Equação 6, a seguir:

$$e = e_{max} \left(\frac{2R_{min}}{R} - \frac{R_{min}^2}{R^2} \right) \quad (6)$$

Em que:

e = taxa de superelevação a adotar [m/m]

e_{max} = taxa máxima de superelevação adotada [m/m]

R = raio da curva [m]

R_{min} = raio mínimo para a taxa máxima de superelevação adotada para a velocidade diretriz em questão [m]

Utilizando-se os coeficientes de atrito transversal máximos de projeto para cada velocidade diretriz (Quadro 2) pode-se, por fim, determinar os raios mínimos obtidos por meio da Equação 1 em função das superelevações máximas admissíveis. Os valores encontram-se no Quadro 3:

Quadro 3 – Raios mínimos em função das taxas máximas de superelevação (em metros)

$e_{m\acute{a}x}$ (%)	Velocidade diretriz (km/h)									
	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	45	75	115	155	210	265	345	435	540
12	20	45	70	105	145	195	245	315	400	490

(fonte: DNER, 1999, p.71)

2.2 Parâmetros para Análise da Segurança ao Tombamento

Ao realizar uma curva em uma rodovia, dois tipos de falha são possíveis: escorregamento ou rolamento (tombamento, capotamento). A falha ocorre quando a aceleração lateral é suficiente para superar o limite da força de atrito, ou para prover um momento que rotacione o veículo sobre seus pneus externos. Em geral, o centro de gravidade de automóveis é suficientemente baixo de maneira que a falha por escorregamento ocorre antes do tombamento. Entretanto, o contrário é verdadeiro para a maior parte dos veículos de carga em função da maior altura do centro de massa, principalmente quando totalmente carregados (BONNISON, 2000, p.91).

Para que o estudo sobre as causas do tombamento de veículos de carga seja possível, é preciso avaliar as propriedades geométricas, mecânicas e dinâmicas dos mesmos, a fim de determinar parâmetros e variáveis que influenciam esse problema, além de dispositivos que auxiliam na segurança e que são abordados a seguir.

2.2.1 O Fenômeno do Tombamento

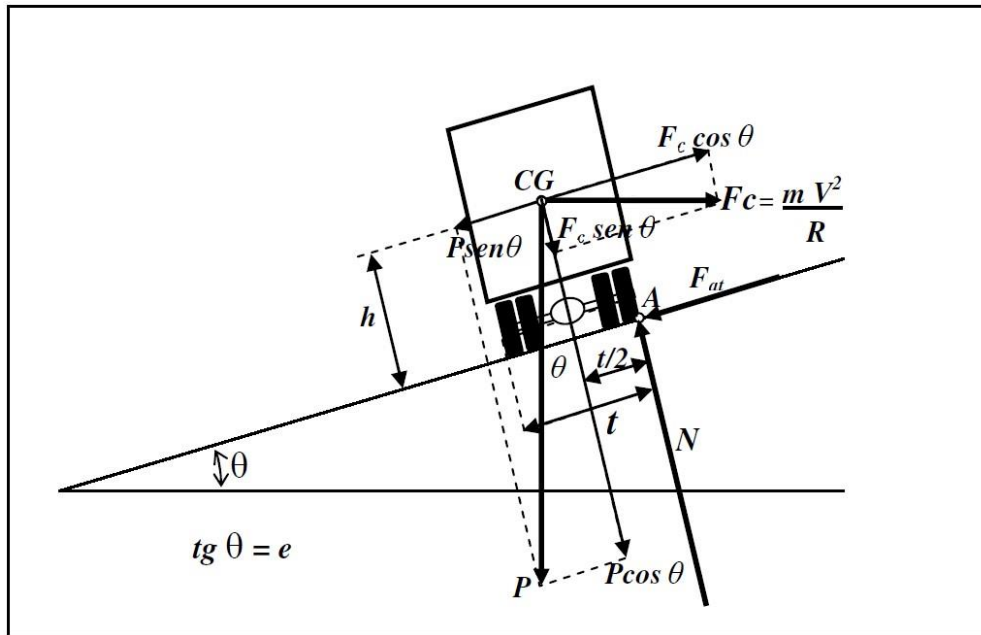
Quando se fala em tombamento, uma dúvida comum é a sua diferença em relação ao capotamento. Conforme exposto por Meyer (2019), o tombamento é caracterizado pelo giro de 90° sobre o eixo longitudinal do veículo, enquanto no capotamento esse giro é de 180° ou mais. Desta forma, ao ocorrer o tombamento, o veículo deixa sua posição normal e passa a se apoiar sobre uma de suas laterais. Já no capotamento o veículo gira em torno de si mesmo em qualquer sentido, podendo parar em qualquer posição, sendo um acidente mais grave. No caso de veículos pesados, de grandes dimensões e centro de gravidade elevado, dentre as duas formas de acidentes o tombamento é o mais comum.

O tombamento, também tratado pelo termo tombamento lateral, é um tipo de acidente que ocorre usualmente em curvas. Nesse sentido, está inextricavelmente ligado à aceleração lateral, a qual é maior em curvas de raios pequenos e, portanto, de menor velocidade, nas quais esse problema é mais intenso (NAVIN, 1992 apud EJZENBERG, 2009).

Para definir um método de cálculo para o comportamento dos veículos ao realizarem curvas, e a definição de parâmetros de tombamento, parte-se da análise de um veículo bidimensional, rígido (pneus, suspensão e estrutura indeformáveis) e unitário (não articulado) que percorre uma curva horizontal plana (sem declividade longitudinal) superelevada. Dessa maneira, durante a manobra de contorno há o surgimento da aceleração lateral (correspondente à aceleração centrífuga) e de um momento que tenta rolar o veículo para o lado de fora da curva, decorrente da diferença de posição vertical em que as forças de atrito (pneu-pavimento) e de inércia (CG) atuam (GILLESPIE, 1992).

O modelo está representado na Figura 2, na qual propriedades relevantes para a análise estão representadas. As forças atuantes sobre o veículo são as mesmas já representadas na Figura 1, com um destaque para a força de apoio (N) e a de atrito (F_{at}) que na iminência do tombamento se concentram no ponto A.

Figura 2 – Modelo para tombamento – veículo bidimensional, rígido e unitário



(fonte: EJZENBERG, 2009, p.72)

2.2.2 O Limite de Tombamento Lateral Estático

À medida que a aceleração lateral aumenta, a carga nas rodas internas diminui. A condição limite da curva ocorrerá quando a carga nas rodas internas atingir zero, ou seja, quando toda a carga tiver sido transferida para as rodas externas. Nesse ponto, o tombamento irá se iniciar, pois o veículo não consegue mais manter o equilíbrio no plano de rolagem. A aceleração lateral na qual o tombamento se inicia é definida como Limite de Tombamento Lateral Estático ou *Static Rollover Threshold* (SRT), o qual é expresso em uma fração da aceleração da gravidade (g) (GILLESPIE, 1992).

Neste ponto, é importante ressaltar a relação direta entre aceleração lateral (a_y), limite de tombamento lateral estático (SRT), coeficiente de atrito (f) e superelevação (e) uma vez que os quatro são correlacionáveis. O SRT é o valor da aceleração lateral na qual o veículo inicia o tombamento. Esta, por sua vez, é equivalente ao fator de atrito adicionada a superelevação, ou equivalente somente a f em superfícies sem superelevações, como é possível se verificar pela Equação 1, com velocidade em m/s, em que $(f + e)g = v^2/R$, logo, $(f + e)g = a_y$. Expressando a_y em função de g tem-se $f + e = a_y$. Sendo assim, as quatro propriedades podem ser comparadas entre si como uma fração de “ g ” para gerar análises e estimativas de comportamento dos veículos frente ao escorregamento e tombamento.

A geometria do veículo tem enorme influência no SRT, por ser diretamente proporcional à bitola (t) do veículo e inversamente proporcional à altura do seu centro de

gravidade (h) (ver Figura 2). Desta forma, é possível afirmar que quanto maior o valor do SRT, maior estabilidade e menor tendência ao tombamento o veículo possui. A Equação 7 fornece o limite de tombamento lateral estático em função da geometria veicular (SRT_{geom}) (GILLESPIE, 1992, p.311):

$$SRT_{geom} = \frac{t}{2h} \quad (7)$$

Em que:

SRT_{geom} = limite de tombamento lateral estático em função da geometria veicular [g]

h = altura do centro de gravidade do veículo em relação ao solo [m]

t = bitola – comprimento do eixo do veículo [m]

A determinação da bitola (t) do veículo pode ser feita por meio da medição da mesma, ou pelos dados do fabricante do veículo. Já a altura do centro de gravidade (h) em relação ao solo pode ser determinada de duas formas teóricas: fazendo-se a média ponderada das massas e alturas dos centros de gravidade do veículo e da carga; ou analisando o comportamento de semirreboques, considerando a altura da base de carga e a altura total do reboque.

A primeira forma leva em consideração tanto o caminhão vazio quanto a carga para determinar uma altura única do centro de gravidade do conjunto veículo + carga. O cálculo é feito por meio da Equação 8 (EJZENBERG, 2009, p.35).

$$h = (m_v \cdot h_v + m_c \cdot h_c) / (m_v + m_c) \quad (8)$$

Em que:

h = altura do centro de gravidade total do veículo em relação ao solo [m]

m_v = massa do veículo [tonelada]

m_c = massa da carga [tonelada]

h_v = altura do centro de gravidade do veículo [m]

h_c = altura do centro de gravidade da carga [m]

Já a segunda forma é citada por Ejzenberg (2009, p.115) para estimar o CG de semirreboques, considerando os veículos com carga homogênea e lotados. Isso pode gerar alturas superestimadas, da ordem de 2,5m, mas que apresentam resultados adequados para a análise do tombamento. O cálculo é expresso pela Equação 9.

$$h = h_{base} + \frac{(h_{total} - h_{base})}{2} = \frac{(h_{total} + h_{base})}{2} \quad (9)$$

Em que:

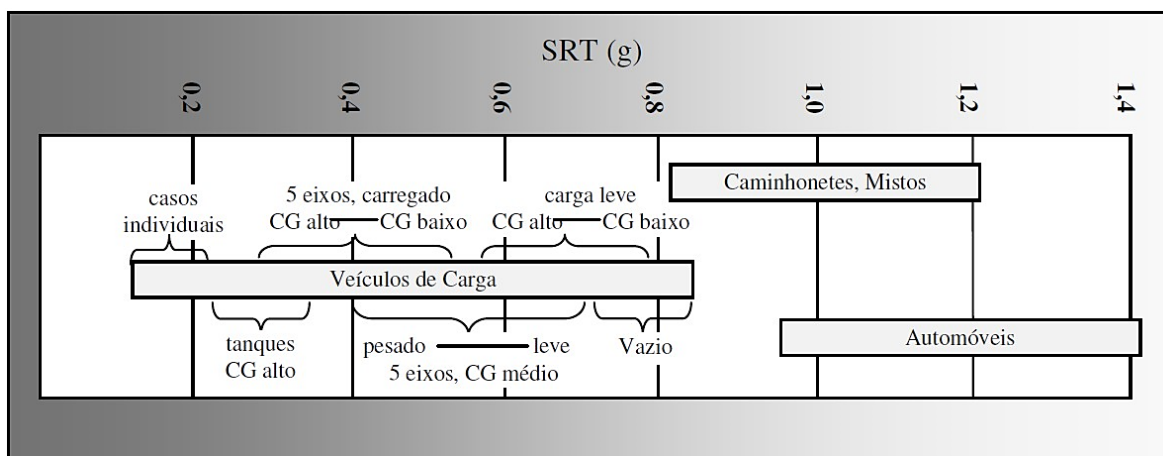
h = altura do centro de gravidade do semi-reboque em relação ao solo [m]

h_{base} = altura da base de carga (a plataforma do reboque) em relação ao solo [m]

h_{total} = altura total do reboque em relação ao solo [m]

Segundo Gillespie (1992), o SRT_{geom} é particularmente atraente por requerer o conhecimento de apenas dois parâmetros veiculares – bitola e altura do CG. Assim, fornece uma estimativa de primeira ordem da resistência ao tombamento de um veículo, e tem maior utilidade para a comparação entre veículos do que para prever níveis absolutos de desempenho. Alguns valores de SRT para diferentes categorias de veículos são: carros esportivos – 1,2 a 1,7g; utilitários compactos – 1,1 a 1,5g; camionetes de carga – 0,9 a 1,1g; e caminhões pesados com valores de 0,4 a 0,6g. Na Figura 3 estão representadas as faixas de variação do SRT em função dos tipos de veículos e carregamentos.

Figura 3 – Faixas de variação do SRT para diferentes categorias de veículos



(fonte: Adaptado de WINKLER e ERVIN, 1999, citado por EJZENBERG, 2009, p.36)

Ejzenberg (2009) comenta sobre ser recomendável a adoção de um valor mínimo de SRT para projetos de rodovias. Tendo em vista que veículos pesados carregados são os que mais estão expostos ao tombamento, a definição de um valor limite mínimo que não seja muito conservador proporciona uma margem mínima de segurança, com projetos de custo razoável, sem impor limitações excessivas e intoleráveis na velocidade regulamentada. Citando diversos estudos, como BONNESON (2000), WINKLER e ERVIN (1999), LTSA-NZ (2008), PREM et al. (2001), WORMLEY et al. (2002), o autor (Ibid., p.150) sugere os seguintes limites de tombamento lateral estático de projeto: $SRT_{projeto\ autos}=1,2$; $SRT_{projeto\ veic.pesado}=0,35$.

O modelo de veículo rígido sugere, a partir desses valores de SRT, que a aceleração lateral necessária para que ocorra o tombamento em veículos de centro de gravidade mais baixo (carros e camionetes) excede a capacidade de contorno proveniente do limite de atrito dos pneus, os quais possuem coeficientes de pico típicos da ordem de 0,8. Isso implica que esses veículos escorregariam em uma superfície plana sem tombar, podendo-se concluir que o tombamento com esses tipos de veículos deveria ser raro, por mais que outros fatores tenham influência nesse comportamento. No caso de veículos pesados, é possível atingir o limite de tombamento lateral dentro dos limites de atrito dos pneus, sendo possível que ocorra o tombamento se o motorista permitir que o veículo gire em uma superfície seca de rodovia (GILLESPIE, 1992).

Após compreender como é obtido o SRT em função da geometria veicular, é necessário determinar o valor do SRT quando da existência de superelevação, a qual está presente em praticamente todas as curvas de rodovias. Gillespie (1992) assinala que a superelevação contribui para a estabilidade do veículo, uma vez que aumenta o SRT geométrico, como pode ser observado na Equação 10, desenvolvida a seguir. Para vias sem superelevação, a equação assume a forma $(t/2h)$.

A partir do modelo para tombamento representado na Figura 2, pode-se obter a condição de equilíbrio na iminência do tombamento, admitindo-se que não ocorra escorregamento, por meio do equilíbrio entre o momento de tombamento (M_T) e o momento de resistência (M_R) no ponto A (EJZENBERG, 2009, p.72):

$$M_T = M_R$$

$$(F_c \cos \theta - P \sin \theta)h = (F_c \sin \theta + P \cos \theta) \frac{t}{2}$$

Dividindo por $(\cos \theta)$ e substituindo $(e = \tan \theta)$ obtém-se:

$$F_c \left(h - e \cdot \frac{t}{2} \right) = P \left(h \cdot e + \frac{t}{2} \right)$$

Substituindo $(F_c = m \cdot v^2/R)$, $(P = m \cdot g)$, e dividindo por (h) tem-se:

$$\frac{m \cdot v^2 \left(1 - e \cdot \frac{t}{2h} \right)}{R} = m \cdot g \left(e + \frac{t}{2h} \right)$$

Dividindo por (m) e explicitando $(v^2/R \cdot g)$ tem-se:

$$\frac{v_T^2}{Rg} = \frac{(e + t/2h)}{(1 - e \cdot t/2h)}$$

Gillespie (1992, p.311) desconsiderou a parcela $(e \cdot t/2h)$ por ser de segunda ordem de grandeza, obtendo a forma simplificada, mas coerente, da Equação 10:

$$SRT_e = \frac{a_y}{g} = \frac{v_T^2}{gR} = \left(e + \frac{t}{2h}\right) \quad (10)$$

Em que:

SRT_e = limite de tombamento lateral estático com superelevação da via [g]

v_T = velocidade crítica de tombamento [m/s]

R = raio da curva [m]

a_y = aceleração lateral [m/s²]

g = aceleração da gravidade [9,81 m/s²]

e = superelevação na curva [m/m]

t = bitola do veículo [m]

h = altura do CG do veículo [m]

É válida a comparação da Equação 10 (limite de tombamento) com a Equação 1 (limite de escorregamento). Ambas são derivadas das equações limites para estabilidade dos veículos, sendo possível verificar que o termo $(t/2h)$ está para o tombamento assim como o termo (f) está para o escorregamento, fazendo a verificação da igualdade de (v^2/gR) entre ambas equações.

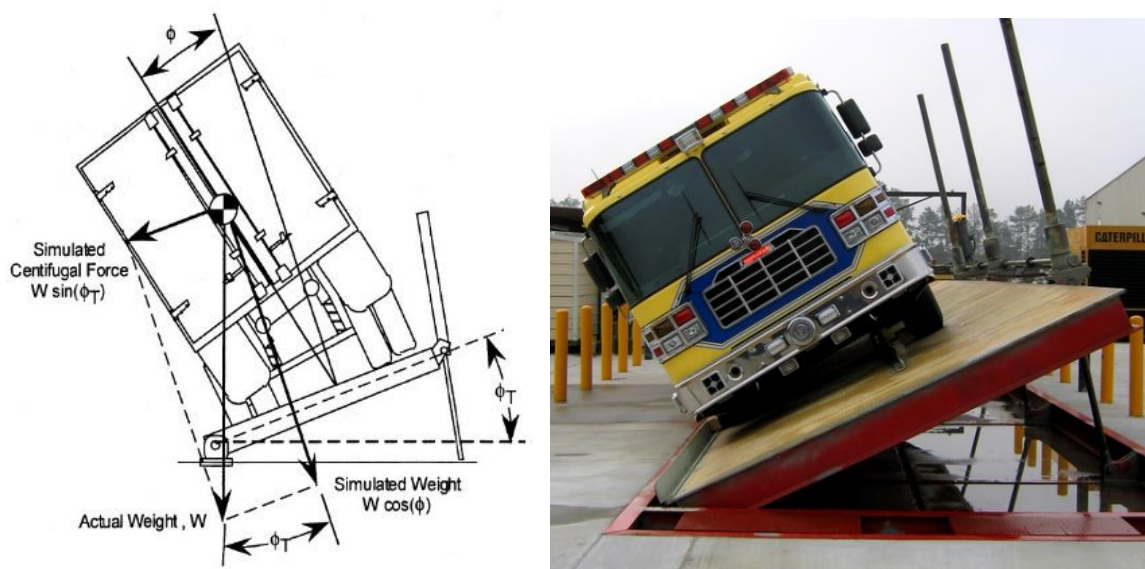
2.2.3 Testes para Determinação do Limite de Tombamento Lateral Real

Apesar das considerações e análises que podem ser feitas para se obter o SRT dos veículos mais próximo da realidade, o limite de tombamento real somente poderá ser obtido por meio de ensaios de tombamento, ou por meio de modelagem computacional que leve em conta todas as variáveis mecânicas e estruturais (intrínsecas) do veículo (EJZENBERG, 2009). Para tanto, testes estáticos e dinâmicos realizados em ambiente controlado podem ser feitos.

O teste estático mais utilizado é chamado de *Tilt Table Experiment* (Ensaio de Inclinação de Mesa, em tradução livre) (Figura 4b) e permite determinar a inclinação transversal máxima suportada por um veículo durante uma condição quase-estática de curva. O ensaio consiste em inclinar o veículo gradualmente sobre uma mesa até que os pneus de um de seus lados percam contato com a superfície (momento no qual o tombamento inicia). Como mostrado na Figura 4a, a componente do peso paralela à superfície da mesa $(W \sin \phi_T)$ simula a força centrífuga atuante sobre o veículo em uma manobra de curva. As

forças laterais e verticais que atuam durante o teste são um pouco reduzidas em relação às forças reais que simulam. Contudo, como os veículos pesados são relativamente instáveis, eles normalmente não exigem um grande ângulo de tombamento (ϕ_T), podendo concluir-se que o teste é adequado para examinar esses veículos (WINKLER, 2000).

Figura 4 – Ensaio de inclinação de mesa: (a) representação esquemática (esquerda); (b) ensaio real (direita)



(fonte: (a) WINKLER e ERVIN, 1999, p.16; (b) REV GROUP, 2019)

Winkler e Ervin (1999, p.16) afirmam que como o tombamento lateral depende da proporção entre a força centrífuga e a força gravitacional, é apropriado concluir que a taxa entre a força lateral simulada ($W \sin \phi_T$) e o peso simulado ($W \cos \phi_T$) representa a aceleração lateral, conforme a Equação 11:

$$a_{ys} = \tan \phi_T = W \sin \phi_T / W \cos \phi_T \quad (11)$$

Em que:

a_{ys} = aceleração lateral simulada [g]

ϕ_T = ângulo (de tombamento) da mesa de inclinação [graus]

W = peso do veículo [N]

Uma vez que a aceleração lateral que inicia o tombamento corresponde ao Limite de Tombamento Lateral Estático, o valor obtido pela Equação 11 pode ser considerado o SRT do veículo. Apesar das simplificações de cálculo, os autores (Ibid., p.17) afirmam que a validade dos conceitos utilizados foi confirmada em diversos ensaios reais de inclinação de mesa. Um destes foi realizado com um veículo de cinco eixos constituído por caminhão

trator + semirreboque, equipado com suspensão a ar. O teste resultou em um valor de aceleração lateral máxima simulada (correspondente ao SRT) de 0,36g.

Além da determinação do SRT do veículo de forma estática, quando deseja-se compreender o real comportamento do veículo ao trafegar, podem ser realizados testes dinâmicos em pista de teste. Eles envolvem o preparo do veículo com carregamento, sensores, acelerômetros, e dispositivos de segurança que limitem o tombamento, além de serem necessárias manobras controladas realizadas por pilotos profissionais (Figura 5). Ainda, pode ser difícil repetir uma mesma manobra várias vezes (MEYER, 2019).

Figura 5 – Teste dinâmico de tombamento lateral



(fonte: MEYER, 2019)

Winkler (2000, p.8) afirma que, na prática, um veículo de teste pode aproximar-se do limite de tombamento lateral quase-estático de duas maneiras: diminuindo muito lentamente o raio de giro a uma velocidade constante, ou aumentando muito lentamente a velocidade a um raio constante. Em ambos os casos, a condição quase-estática pode ser mantida razoavelmente bem até que os pneus dos eixos de tração levantem. Nesse momento, no entanto, o veículo normalmente perde tração, o que leva à perda de velocidade, de modo que a aceleração lateral diminui imediatamente e as rodas de tração voltam à superfície. O processo pode ter de ser repetido inúmeras vezes.

Como é possível perceber, testes dinâmicos são complexos de serem realizados, o que leva ao uso da modelagem computacional como uma outra ferramenta para prever o comportamento de veículos quanto ao tombamento em situações dinâmicas (MEYER, 2019).

2.2.4 Fatores que Influenciam no Tombamento

A condição de tombamento depende das características geométricas, mecânicas e estruturais do veículo, mas também do tipo e condição da carga transportada, do comportamento do motorista e das condições da via. Esses fatores, bem como o fenômeno da amplificação traseira e o efeito *slosh*, são apresentados nesta seção.

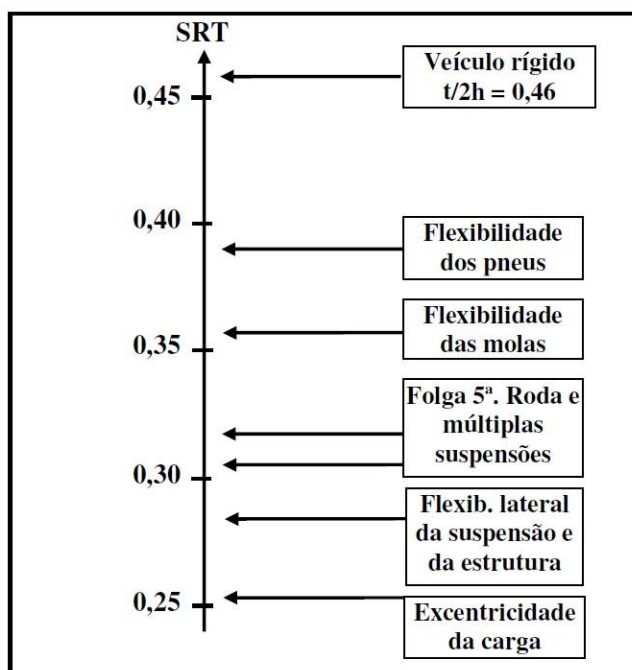
2.2.4.1 Fatores Intrínsecos ao Veículo

Ejzenberg (2009, p.38) assinala as características dos veículos que influenciam o limite de tombamento lateral estático:

Além dos fatores que compõe o SRT geométrico (bitola do eixo e altura do centro de gravidade), os seguintes fatores intrínsecos do veículo restringem o SRT: flexibilidade da suspensão, flexibilidade dos pneus, folga da suspensão e da 5ª roda (*lash*), torção do veículo, deformação lateral da estrutura do veículo (visto como uma viga fletida horizontalmente pela aceleração inercial da carga). Isso resulta em valor do SRT real inferior ao superestimado SRT_{geom} .

Uma representação do efeito desses fatores veiculares na redução do valor do SRT encontra-se na Figura 6.

Figura 6 – Fatores intrínsecos redutores do SRT em veículos pesados



(fonte: Adaptado de WINKLER e ERVIN, 1999, citado por EJZENBERG, 2009, p.38)

Winkler (2000, p.7) afirma que a estabilidade ao tombamento é determinada pela soma dos efeitos de diversos mecanismos de conformidade (fatores intrínsecos). Enquanto o efeito de cada fator isoladamente pode ser pequeno, o efeito combinado degrada a estabilidade, podendo reduzi-la a 60% da estabilidade de um veículo ideal rígido.

2.2.4.2 Fatores Extrínsecos ao Veículo – Via e Condutor

Quanto aos fatores relacionados à via, há três principais que induzem a um aumento na aceleração transversal (v^2/R) e, portanto, aumentam o risco de tombamento em veículos pesados. São eles: (i) raios pequenos; (ii) declividade longitudinal da via, por induzir ao aumento da velocidade e poder provocar a perda de eficiência dos freios, por aquecimento, em declives longos; e (iii) superelevação, que é maior quanto mais próximo ao mínimo o raio for, auxiliando na realização das curvas, porém permitindo que as mesmas sejam percorridas com maior velocidade (EJZENBERG, 2009).

Em relação à declividade longitudinal, Ejzenberg (2009, p.171) afirma que as margens de segurança ao tombamento diminuem em curvas com greide descendente, uma vez que a frenagem para manutenção da velocidade alivia a carga do eixo traseiro, reduzindo o SRT do veículo. Essa redução da margem de segurança é mais acentuada em curvas de baixa velocidade de projeto, como em alças de interseções e curvas de relevo montanhoso, que possuem raios muito pequenos, sendo críticas para a ocorrência de tombamento lateral em veículos pesados.

O comportamento do condutor também tem parcela relevante na segurança, uma vez que ele pode definir um raio menor de trajetória na curva, desempenhar uma velocidade maior, ou realizar frenagens e ações inadequadas dependendo da situação em que se encontra. Meyer (2019) chama atenção para fatores como: muitas horas seguidas dirigindo, o que gera cansaço, redução dos reflexos e tomadas de decisão tardias; ultrapassagens perigosas, em locais proibidos; mudança repentina de faixa e pouca distância entre veículos; uso de bebidas alcoólicas ou entorpecentes; uso do celular e não observação da via; e a falta de revisão do veículo, que leva a condições inadequadas de trafegabilidade.

Ejzenberg (2009, p.50) comenta a respeito da influência do comportamento do motorista frente ao tombamento, que, somados aos fatores veiculares, contribuem para a redução da segurança ao tombamento lateral em veículos pesados:

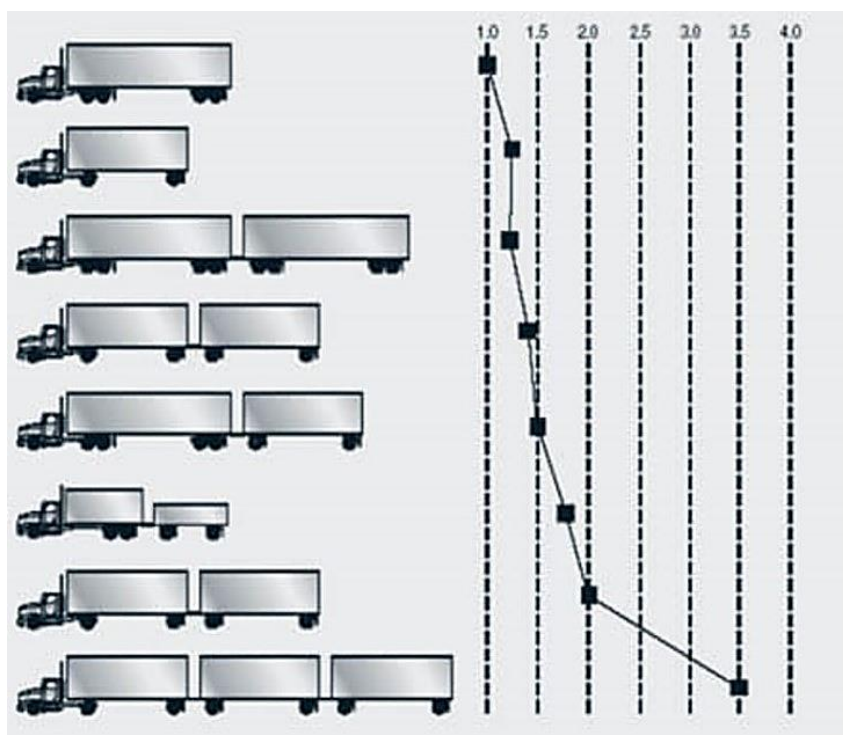
Algumas das características de segurança intrínsecas do veículo interagem fortemente com o estilo de condução, mais ou menos agressivo, que se manifesta inclusive nas manobras evasivas. Esterçamentos tardios, portanto, mais rápidos, geram maior aceleração transversal transitória. Frenagens tardias, portanto, mais intensas, promovem maior desequilíbrio longitudinal da carga nos eixos, e desequilíbrio transversal, quando a trajetória é curvilínea.

2.2.4.3 Amplificação Traseira

Veículos pesados articulados sofrem mais com a redução da estabilidade lateral por estarem sujeitos ao fenômeno da amplificação traseira, que é o aumento transitório da aceleração lateral ao longo do veículo. Esse fenômeno ocorre quando a frequência da manobra se aproxima ou excede a frequência natural do movimento de rolamento do veículo. Como a amplificação traseira é próxima de um em baixas frequências, esses veículos se comportam muito bem em condições normais. No entanto, a amplificação traseira tende a atingir um pico na faixa de frequência durante manobras rápidas e evasivas de emergência, tornando esses veículos bastante suscetíveis à capotagem dos reboques traseiros (WINKLER, 2000).

Uma representação da influência da combinação de veículos na amplificação traseira encontra-se na Figura 7.

Figura 7 – Influência da combinação de veículos na amplificação traseira



(fonte: MEYER, 2019)

Os valores do gráfico da Figura 7 significam a quantas vezes mais aceleração lateral o último reboque está exposto, em função das suas características e combinação. Isso quer dizer que um veículo com amplificação traseira de 2 tem duas vezes mais chance de tombar o reboque traseiro do que o trator. Ou que há 3,5 vezes mais chance de tombar o último trailer de uma combinação tripla do que um conjunto monoarticulado de cinco eixos. Uma variável influente na amplificação traseira que não foi determinada por Meyer (2019) é o tipo de articulação utilizada, tendo em vista que os graus de liberdade de movimento que

cada uma permite pode aumentar ou reduzir o efeito da amplificação. Como os veículos articulados não são o foco deste trabalho, o efeito da amplificação traseira no SRT não foi estudado.

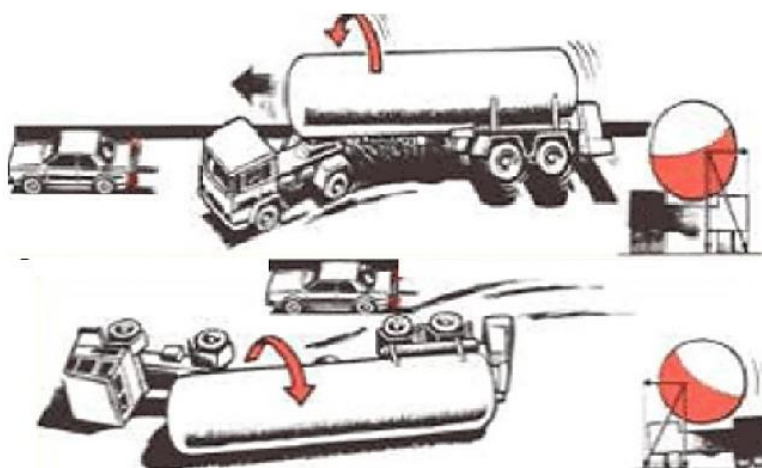
2.2.4.4 Efeito Slosh

A excentricidade e tipos de carga transportadas também têm uma parcela significativa de impacto no SRT do veículo. Ejzenberg (2009, p.46) afirma:

Cargas líquidas, vivas, bem como cargas suspensas, provocam grande redução do limite de tombamento lateral do veículo transportador. Em geral, ao efeito “estático” de deslocamento do centro de gravidade da carga médio, somam-se também os efeitos dinâmicos de turbulência e oscilação da carga (incluindo choques com as paredes do compartimento de carga) que acentuam a instabilidade gerada.

Essa problemática é citada por Winkler (2000, p.11), o qual analisa o comportamento de cargas líquidas em caminhões tanque. Ao preencher um tanque de forma parcial, permite-se que o líquido se mova de um lado para o outro, produzindo o efeito *slosh*. O *slosh* é uma preocupação à segurança, uma vez que o deslocamento lateral da carga reduz o desempenho do veículo nas curvas. Os movimentos dinâmicos da carga podem, inclusive, ocorrer fora de fase (sincronia) com os movimentos laterais do veículo, reduzindo ainda mais o limite de tombamento lateral. Esse fenômeno pode ocorrer durante um movimento de ultrapassagem que altere bruscamente a trajetória do veículo, como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Efeito *Slosh* em caminhão tanque durante uma ultrapassagem



(fonte: MEYER, 2019)

Para diminuir esse problema, há caminhões tanque compartimentados, com subdivisões internas que restringem o movimento do líquido, auxiliando na estabilidade. Há uma recomendação técnica que é regra na Europa, mas que ainda não está estabelecida no Brasil, em que tanques com capacidade acima de 7500l, para transporte de materiais líquidos ou gases liquefeitos, devem ser preenchidos com mais de 80% da capacidade ou com menos

de 20%. Desta forma, o efeito do balanço do líquido no tanque fica reduzido e aumenta a segurança ao tombamento (MELO, 2018).

2.2.5 Dispositivos de Segurança ao Tombamento

Por fim, modernos dispositivos eletrônicos inteligentes estão sendo desenvolvidos para sinalizar para o motorista o risco ao tombamento antes que ele ocorra, ou controlar as suspensões e freios dos veículos em situações de tombamento iminente. Winkler (2000, p.14) comenta do Sistema de Aviso de Tombamento (RSA) desenvolvido pela *Roadster Reseach of Melbourne*, da Austrália, que foi utilizado em alguns caminhões tanque. O sistema produz um aviso sonoro ao motorista, baseado na medição em tempo real da aceleração lateral comparada com uma predeterminada (o limite de tombamento estático do veículo).

O Instituto de Pesquisas em Transportes da Universidade de Michigan (UMTRI), seguindo essa linha, desenvolveu um protótipo de RSA que inclui um display visual para o motorista, e compara a aceleração lateral atual do veículo com o limite de tombamento lateral estático para curvas à esquerda e à direita. O limite de tombamento é calculado em tempo real baseado em sinais de sensores instalados a bordo, e os limites para cada nova condição de carregamento são determinados após apenas alguns minutos com o veículo em movimento (WINKLER, 2000). A Figura 9 representa o display do sistema.

Figura 9 – Display do RSA desenvolvido pela UMTRI



(fonte: Adaptado de ERVIN et al., 1998, citado por WINKLER, 2000, p.14)

Winkler e Ervin (1999, p.32) assinalam que uma outra abordagem existente para a redução dos acidentes de tombamento é o controle ativo do esterçamento do veículo a fim de prevenir que a aceleração lateral exceda o limite de tombamento. Isso é feito por meio da

aplicação seletiva dos freios de cada roda para gerar momentos apropriados de esterçamento e/ou simplesmente reduzir a velocidade do veículo. Mencionam também (Ibid, p.31) que há protótipos de estabilizadores ativos, os quais são instalados em todas as suspensões do veículo, e estão sendo desenvolvidos na Universidade de Cambridge.

3 Metodologia

Baseado nos estudos, parâmetros e fatores influentes no tombamento de um veículo pesado explicitados no Capítulo 2, foi desenvolvida uma planilha de cálculo automatizada a fim de determinar a velocidade de tombamento e margem de segurança a que um veículo está exposto, a partir de dados de entrada baseados na norma brasileira para projetos de rodovias, parâmetros veiculares e carregamento. A metodologia empregada será aqui descrita.

A fim de aproximar a análise para situações reais de tráfego, para que a planilha possa ser utilizada em diversas simulações de rodovias com diferentes propriedades, algumas premissas foram determinadas. Dentre elas, algumas são fixas e outras são alteráveis em função do caso que se deseja analisar. Como será mostrado no estudo de caso do Capítulo 4, os dados de entrada se adequarão às condições da rodovia, veículo e carga em questão.

3.1 Veículos Analisados

A determinação dos tipos de veículos analisados foi baseada na literatura estudada e na norma brasileira que regula os tipos de veículos de projeto, bem como suas dimensões e pesos brutos totais. Os veículos foram divididos em duas categorias: veículos pesados não articulados; e semirreboques/reboques.

Este trabalho se baseia na análise quanto ao tombamento de veículos em condições estáticas de equilíbrio em curva. Sendo assim, o fenômeno dinâmico da amplificação traseira a que semirreboques estão expostos não está incorporado na análise. Na condição estática, o equilíbrio de uma combinação de veículos (caminhão trator + semirreboques) em curva horizontal se resume à análise de equilíbrio do último veículo da composição, sendo essa análise a feita por Navin (1992 apud EJZENBERG, 2009).

Para o estudo do comportamento de caminhões optou-se por tomar como base o veículo do Tipo “O” segundo a classificação do DNIT (2010), por englobar os maiores veículos não articulados permitidos pela legislação brasileira, sendo o que possui maior capacidade de carga se aproximando do utilizado no modelo de tombamento estudado

(veículo bidimensional, rígido e unitário). São comumente chamados de Caminhão *Truck* ou Trucado, e seu Peso Bruto Total (PBT) máximo permitido é de 23 toneladas, para uma composição de 3 eixos, sendo um eixo simples de roda simples (6 toneladas), e um eixo tandem duplo (17 toneladas) (DNIT, 2006).

A capacidade de carga desse tipo de veículo varia de 10 a 14 toneladas (STABELINI, 2017). Desta forma, foram adotados os valores padrão de 14 toneladas para a massa de carga, e 9 toneladas para a massa do caminhão, totalizando o PBT de 23 toneladas.

A altura do centro de gravidade do caminhão utilizada como base é de 1,4m, valor estimado por Gillespie (1992, p.312) para caminhões médios. O autor considerou a largura da bitola destes veículos como sendo de 1,9m, também adotada como padrão. Como demonstrado na seção 2.2.1, o eixo de giro do veículo durante o tombamento lateral se localiza em uma das extremidades do eixo de roda – na extremidade da bitola –, e por isso a importância de conhecer seu valor, determinante para definição do SRT.

Já a altura padrão do CG da carga foi determinada como estando na metade da altura total de carga, baseando-se na altura da base de carga (1,4m) e altura máxima legal do veículo (4,4m). Dessa forma, o valor corresponde a 1,4m acrescido de 1,5m, obtendo-se a altura do CG da carga (em relação ao solo) de 2,9m.

Definidas as massas e as alturas dos centros de gravidade do caminhão e da carga, a altura do CG do caminhão carregado foi determinada fazendo-se a média das alturas ponderada pelas massas, por meio da Equação 8.

Para o estudo de semirreboques/reboques, a altura do centro de gravidade estimada foi determinada utilizando-se a Equação 9, do capítulo anterior. Vale citar que Ejzenberg (2009, p.115) afirma que as alturas de CG obtidas por meio dessa equação podem estar superestimadas, por implicar em considerar que todos os caminhões estejam totalmente lotados e com carga homogênea. Porém, dados mostrados por Navin (1992 apud EJZENBERG, 2009) indicam que para caminhões com pelo menos metade da capacidade de carga, a maior parte dos acidentes ocorrem por tombamento lateral, permitindo o uso dessa estimativa de altura de CG. As alturas assim estimadas ficam da ordem de 2,5m.

É pertinente lembrar que a altura da base de carga, bem como a altura total do semirreboque pode ser alterada nos parâmetros de entrada da planilha para cada configuração veicular que se deseja simular. Por padrão, a altura da base de carga (plataforma) considerada é de 1,4m, baseado na média das alturas das plataformas para semirreboques segundo Randon (2020). A altura total do reboque, por sua vez, foi definida

como a altura máxima permitida segundo a Resolução nº 210 do CONTRAN (BRASIL, 2006), de 4,40m.

Quanto à posição transversal do CG, considerou-se como estando na metade da bitola, como é utilizado para a determinação padrão do SRT. Porém, a fim de simular um deslocamento de carga (carga viva, líquida, ou solta) pode-se alterar essa posição, como será analisado no estudo de caso do Capítulo 4.

3.2 Parâmetros da Via

Além dos parâmetros veiculares, os parâmetros da via analisada são essenciais para a determinação da segurança ao tombamento. Baseado no Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999) – Quadros 1, 2 e 3 deste trabalho – foram elaboradas as diversas combinações possíveis de velocidade diretriz (V_{dir}), superelevação máxima ($e_{máx}$), raio mínimo ($R_{mín}$) e coeficiente de atrito transversal máximo de projeto ($f_{máx}$) para cada classe de rodovia – 0, 1, 2, 3 e 4 – e relevo – Plano, Ondulado e Montanhoso –, resultando na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de projeto para cada classe e relevo de rodovia

Classe/Relevo	V_{dir} (km/h)	$e_{máx}$ (%)	$R_{mín}$ (m)	$f_{máx}$
0P	120	10%	540	0,11
0O	100	10%	345	0,13
0M	80	10%	210	0,14
1P	100	10%	345	0,13
1O	80	10%	210	0,14
1M	60	8%	125	0,15
2P	100	8%	375	0,13
2O	70	8%	170	0,15
2M	50	8%	80	0,16
3P	80	8%	230	0,14
3O	60	8%	125	0,15
3M	40	8%	50	0,18
4P	70	6%	185	0,15
4O	50	6%	90	0,16
4M	40	6%	55	0,18

(fonte: Adaptado de DNER, 1999)

Dessa forma, basta determinar o código da classe/relevo que os parâmetros são automaticamente definidos. Caso alguma rodovia a ser analisada possua parâmetros de projeto diferentes dos estipulados pelo DNER (1999), basta determina-los manualmente.

Uma vez que os parâmetros de projeto são para condições limite, ao analisar uma curva com raio superior ao mínimo, a superelevação e o coeficiente de atrito demandado são

alterados. A superelevação é reduzida até um mínimo de 2% (necessário para o escoamento da água da pista) segundo a Equação 6, porém é possível também defini-la manualmente caso tenha sido feita uma verificação *in loco* da superelevação na curva a ser trabalhada, e seu valor seja diferente do recomendado. O mesmo se aplica aos coeficientes de atrito lateral fornecidos pela superfície do pavimento, que foram utilizados como padrão os valores presentes na Tabela 1 da seção 2.1.3.1, em função da velocidade de projeto. Já o coeficiente de atrito lateral demandado foi determinado por meio da Equação 5, levando em consideração os fatores veicular e de sobresterçamento, bem como o raio da curva, a superelevação existente e a velocidade desenvolvida pelo veículo.

Para apresentar a planilha de cálculo desenvolvida, a Figura 10 apresenta os dados de entrada e parâmetros de cálculo utilizados para o Cenário 2 do Estudo de Caso, que será tratado no Capítulo 4.

Figura 10 – Planilha de cálculo para Cenário 2 do Estudo de Caso: dados de entrada

Verificação do Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT - <i>Static Rollover Threshold</i>) e Margem de Segurança (MS) para veículos de carga em curvas		
DADOS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE CÁLCULO
Classe e Relevo da rodovia	2M	2M
Raio da Curva [m]	100	100
Coefficiente de Atrito Lateral Máximo Disponível (f_{disp}) [adim.]	0,24	0,24
Superelevação Adotada (e_{adot}) [%]		7,68%
Velocidade Adotada (V_{adot}) [km/h]		50
Bitola (t) [m]		1,90
Posição horizontal do CG em relação à bitola [adim]		0,50
Fator de calibração (b_r) [adim.]		0,60
Raio Mínimo de Projeto [m]		80
Coefficiente de Atrito Transversal Máximo de Projeto ($f_{máx}$) [adim.]		0,16
Superelevação Máxima de Projeto ($e_{máx}$) [%]		8%
Velocidade de Projeto [km/h]		50
Superelevação Reduzida (e_{reduz}) [%] - para raios acima dos mínimos		7,68%
Coefficiente de Atrito Lateral Demandado (f_{dem}) [adim.]		0,16
CENTRO DE GRAVIDADE PARA VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS		
Altura CG veículo (h_v) [m]		1,40
Altura CG carga (h_c) [m]		2,90
Massa veículo (m_v) [toneladas]		9,00
Massa carga (m_c) [toneladas]		14,00
CENTRO DE GRAVIDADE PARA SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
Altura base carga (h_{base}) [m]		1,40
Altura total semirreboque (h_{total}) [m]		4,40

(fonte: elaborada pelo autor)

3.3 Margem de Segurança ao Escorregamento

A margem de segurança ao escorregamento é definida como a diferença entre o atrito fornecido e o demandado. Bonneson (2000, p.102) afirma que a falha é iminente quando a

demanda atinge ou excede o limite disponível de atrito ($f_{dem} > f_{disp}$), e utiliza a Equação 12 para calcular a MS ao escorregamento:

$$MS_E = f_{disp} - f_{dem} \quad (12)$$

Em que:

MS_E = margem de segurança ao escorregamento lateral [g]

f_{disp} = fator de atrito lateral disponível [adim.]

f_{dem} = fator de atrito lateral demandado [adim.]

A velocidade limite em que o escorregamento lateral ocorrerá pode ser determinada, e é demonstrada por Ejzenberg (2009, p.105), baseado nos estudos de Bonneson (2000). Ela nada mais é do que um rearranjo da Equação 1, acrescida dos fatores veicular (b_v) e de sobresterçamento (b_s) – tratados na seção 2.1.3.1 – conforme abaixo:

$$V_E = \sqrt{\frac{gR}{b_s} \cdot \left(\frac{f_{y,max,sl}}{b_v} + e \right)}$$

Sendo ($f_{y,max,sl} = f_{disp}$), (b_v) = 1,1, (b_s) = 1,15 e adotando-se (v) em km/h e (g) = 9,8 m/s², tem-se a Equação 13:

$$V_E = \sqrt{\frac{127R}{1,15} \cdot \left(\frac{f_{disp}}{1,1} + e \right)} \quad (13)$$

Em que:

V_E = velocidade limite de escorregamento lateral [km/h]

R = raio da curva [m]

f_{disp} = fator de atrito lateral estático máximo disponível [adim.]

e = superelevação na curva [m/m]

3.4 Margem de Segurança ao Tombamento

A fim de determinar a margem de segurança ao tombamento, algumas análises preliminares são necessárias. Inicialmente, para aproximar as análises à realidade, foi incorporado um fator redutor da rigidez veicular baseado nos estudos de Winkler (2000) e Ervin et al. (1985, apud BONNESON, 2000). Como discutido previamente na seção 2.2.1, o modelo para estudo do comportamento de veículos pesados frente ao tombamento é válido para veículo bidimensional, rígido e unitário. Desta forma, para a determinação do SRT_{geom} e SRT_e foram utilizadas as Equações 7 e 10, respectivamente.

Contudo, Bonneson (2000, p.92) incorpora ao modelo o fator de calibração (b_r) estudado por Ervin et al. (1985, apud BONNESON, 2000), que obteve-o por meio de simulação computacional utilizando o modelo UMTRI Phase 4, permitindo incluir efeitos dinâmicos e fornecer um limite de estabilidade com fatores não incorporados nos limites estáticos. Este fator refere-se à redução do SRT_{geom} em função da flexibilidade de suspensão, pneus e estrutura (ver Figura 6) e assume valores típicos entre 0,4 e 0,8. Isso significa uma redução, em função dos fatores intrínsecos, de 20% a 60% da estabilidade ideal de um veículo rígido. O fator de redução do SRT, adotado por padrão, foi 0,6, por este ser a média dos valores apresentados, sendo também o considerado por Winkler (2000, p.7).

A partir disso, Bonneson (2000, p.93) traz a Equação 14 para definir o limite de tombamento lateral considerando o fator de calibração. É importante reparar que se trata da clássica expressão do SRT_e de Gillespie (1992, p.311) – ver Equação 10 – ajustada pelo fator (b_r), como segue:

$$RT = b_r \frac{t}{2h} + e \quad (14)$$

Em que:

RT = *Rollover Threshold* (Limite de Tombamento Lateral) [g]

b_r = fator de calibração (tipicamente, $0,4 < b_r < 0,8$) [adim.]

t = bitola do veículo [m]

h = altura do CG do veículo [m]

e = superelevação na curva [m/m]

Foram realizadas, portanto, ambas análises – veículo rígido (modelo ideal) e veículo flexível (incorporando fator de calibração) – para veículos tipo “O” e para semirreboques, totalizando quatro análises.

Para que a margem de segurança ao tombamento lateral possa ser definida, deve-se lembrar a forma de determinar a aceleração lateral a que o veículo está sujeito em função das variáveis atuantes no momento da realização da curva. Conforme exposto na seção 2.1.3, a Equação 1 utilizada pela AASHTO (2001, p.133) é a seguinte:

$$(f + e) g = v^2/R$$

Sendo (v^2/R) correspondente à aceleração centrípeta, a aceleração lateral atuante no veículo, em função de (g), é determinada pela Equação 15 (baseada em Ejzenberg, 2009, p.151):

$$a_{yat} = f_{dem} + e \quad (15)$$

Em que:

a_{yat} = aceleração lateral atuante no veículo [g]

f_{dem} = fator de atrito lateral demandado [adim.]

e = superelevação na curva [m/m]

É válido citar que a superelevação a ser adotada é obtida por meio da redução para raios acima do mínimo, pela Equação 6, ou por meio de verificação *in loco*. E o fator de atrito lateral demandado – ver Equação 5 – é função do raio da curva, da superelevação e da velocidade do veículo. Incorporando a Equação 5 (f_{dem}) na Equação 15 e desenvolvendo-a, tem-se:

$$a_{yat} = 1,1 \left(1,15 \cdot \frac{v^2}{127R} - e \right) + e$$

$$a_{yat} = 0,01 \cdot \frac{v^2}{R} - 0,1 \cdot e$$

A partir disso, percebe-se que a superelevação tem uma parcela muito pequena de relevância na aceleração lateral atuante no veículo (o termo é da ordem dos centésimos ou milésimos), porém, superelevações maiores estão relacionadas a raios menores, os quais, combinados com o aumento da velocidade, afetam significativamente a aceleração lateral. Entende-se, portanto, o impacto que a velocidade e o raio possuem na aceleração lateral, determinante para a segurança viária.

A margem de segurança ao tombamento lateral é dada, portanto, pela diferença entre o SRT_e e a aceleração lateral provocada pela curva, conforme a Equação 16 (adaptada de Ejzenberg, 2009, p.153):

$$MS_T = SRT_e - a_{yat} \quad (16)$$

Em que:

MS_T = margem de segurança ao tombamento lateral [g]

SRT_e = limite de tombamento lateral estático com superelevação [g]

a_{yat} = aceleração lateral atuante no veículo [g]

Assim como a velocidade de escorregamento, a velocidade de tombamento também pode ser determinada, porém, partindo-se do rearranjo da Equação 10 acrescida dos fatores

de calibração (b_r) e de sobresterçamento (b_s), demonstrada por Ejzenberg (2009, p.105), baseado nos estudos de Bonneson (2000), conforme abaixo:

$$V_T = \sqrt{\frac{gR}{b_s} \cdot \left(b_r \cdot \frac{t}{2h} + e \right)}$$

17: Sendo (b_s) = 1,15 e adotando-se (v) em km/h e (g) = 9,8 m/s², tem-se a Equação

$$V_T = \sqrt{\frac{127R}{1,15} \cdot \left(b_r \cdot \frac{t}{2h} + e \right)} \quad (17)$$

Em que:

V_T = velocidade limite de tombamento lateral [km/h]

R = raio da curva [m]

b_r = fator de calibração (tipicamente, $0,4 < b_r < 0,8$) [adim.]

t = bitola do veículo [m]

h = altura do CG do veículo [m]

e = superelevação na curva [m/m]

3.5 Segurança Geral

Do ponto de vista prático o conhecimento da causa de falha é muito importante. Por esta razão, verificar separadamente o escorregamento e o tombamento torna-se importante. Apesar de, matematicamente, a margem de segurança simultânea indicar a ocorrência de falha, a causa do acidente pode ser recuperada por meio do valor mínimo que determinou a condição de falha (EJZENBERG, 2009, p.106).

É pertinente perceber a similaridade entre a MS_T e a MS_E na forma de cálculo. Enquanto a primeira é definida como a diferença entre a aceleração lateral máxima suportada pelo veículo antes da falha por tombamento (SRT_e) e a aceleração lateral experimentada pelo veículo nas condições em que se encontra (a_{yat}), a segunda é determinada pela diferença entre o atrito máximo disponível na interface pneu-pavimento (f_{disp}) e o atrito demandado pelo veículo (f_{dem}). Logo, ambas são uma relação entre os parâmetros máximos disponíveis e os solicitantes, devidamente corrigidos pelos fatores considerados.

Ejzenberg (2009, p.33) faz uma afirmação pertinente em relação às margens de segurança:

Contrariamente ao tombamento, as margens de segurança para escorregamento são maiores, pois contam com reservas decorrentes da adoção de valores conservadores de fatores de atrito disponíveis (f_{disp}), ainda que também sejam afetadas pela eventual diferença entre raio da curva e trajetória do veículo. Além disso, o escorregamento consome energia, reduz a velocidade, e com pequena ajuda do condutor pode ser controlado.

O autor (Ibid., p.149) lembra, ainda, que apesar do escorregamento a baixa velocidade ser de fácil controle pelo condutor, isso pode levar o veículo à saída de pista e ao encontro da guia, possibilitando o tombamento por travamento do escorregamento – fenômeno conhecido como *tripping* –, além de expor o veículo a um grave risco de colisão, caso o mesmo invada total ou parcialmente a contramão, em pistas com sentido duplo de tráfego.

Quanto aos modelos analisados de escorregamento em curva do *Green Book* (AASHTO, 2001), DNER (1999) e DNIT (2005), conclui-se que não são sensíveis ao tombamento lateral de veículos pesados, o qual pode ser associado a outros mecanismos (amplificação traseira e transferência lateral de carga, que ocorrem em manobras de simples correção de trajetória em curva). O modelo veicular de massa pontual dos critérios adotados pelas normas é também insensível à torção da estrutura, suspensão e articulação de veículos, ignorando o efeito do greide e do sobresterçamento, admitindo fator de atrito limitado por condição de conforto do usuário, supondo implicitamente (sem verificação) que o tombamento não ocorra. Pode-se afirmar, portanto, que os critérios usuais de projeto de curvas horizontais utilizados não são adequados para veículos pesados, os quais podem tombar antes que o limite de atrito lateral seja alcançado (EJZENBERG, 2009).

A fim de permitir uma análise mais precisa, optou-se pela adoção de faixas de segurança para os valores de MS. Estas baseiam-se na margem de 0,1 utilizada por Baker et al. (2001, apud EJZENBERG, 2009) tratando do sistema de alerta de tombamento do Departamento de Transportes da Virginia/EUA, e tem correlação com o grau de desconforto sentido pelo motorista e passageiros ao realizarem uma curva. A partir disso, tanto para escorregamento (MS_E), quanto para tombamento lateral (MS_T), adotaram-se as seguintes faixas de segurança em função do valor da MS:

- Conforme – acima de 0,2
- Parcialmente Conforme – entre 0,1 e 0,2
- Não Conforme – abaixo de 0,1 (alto risco de escorregamento/tombamento)

Por fim, uma vez determinadas as margens de segurança ao escorregamento e ao tombamento lateral, determinou-se um critério de segurança simultâneo, definido como

Segurança Geral (SG), para os quatro casos estudados – veículos pesados não articulados (SG_{VPNA}) e semirreboques (SG_{SR}), rígidos e flexíveis – da seguinte maneira:

- Seguro – MS_E e MS_T acima de 0,2
- Parcialmente Seguro – alguma MS entre 0,1 e 0,2, e nenhuma abaixo de 0,1
- Não Seguro – alguma MS abaixo de 0,1

Para concluir a apresentação da planilha de cálculo desenvolvida, a Figura 11 demonstra os dados de saída obtidos para o Cenário 2 do Estudo de Caso.

Figura 11 – Planilha de cálculo para Cenário 2 do Estudo de Caso: dados de saída

DADOS DE SAÍDA	VEÍCULO RÍGIDO	VEÍCULO FLEXÍVEL
VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS		
Largura CG [m]	0,95	0,95
Altura CG (h) [m]	2,31	2,31
SRT _{geom} [g]	0,41	0,25
SRT _e [g]	0,49	0,32
Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	73	60
Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,24	0,08
SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
Largura CG [m]	0,95	0,95
Altura CG (h) [m]	2,90	2,90
SRT _{geom} [g]	0,33	0,20
SRT _e [g]	0,40	0,27
Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	67	55
Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,16	0,03
V_E [km/h] - Velocidade de escorregamento lateral	57	
Margem de Segurança ao Escorregamento (MS_E) [g]	0,07	
SEGURANÇA GERAL VEÍCULOS PESADOS (SG_{VPNA})	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO
SEGURANÇA GERAL SEMIRREBOQUES (SG_{SR})	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO

(fonte: elaborada pelo autor)

Com todos os parâmetros e metodologias devidamente explicitados, pode-se prosseguir para a aplicação prática desses conceitos, no estudo de caso a seguir.

4 Estudo de Caso

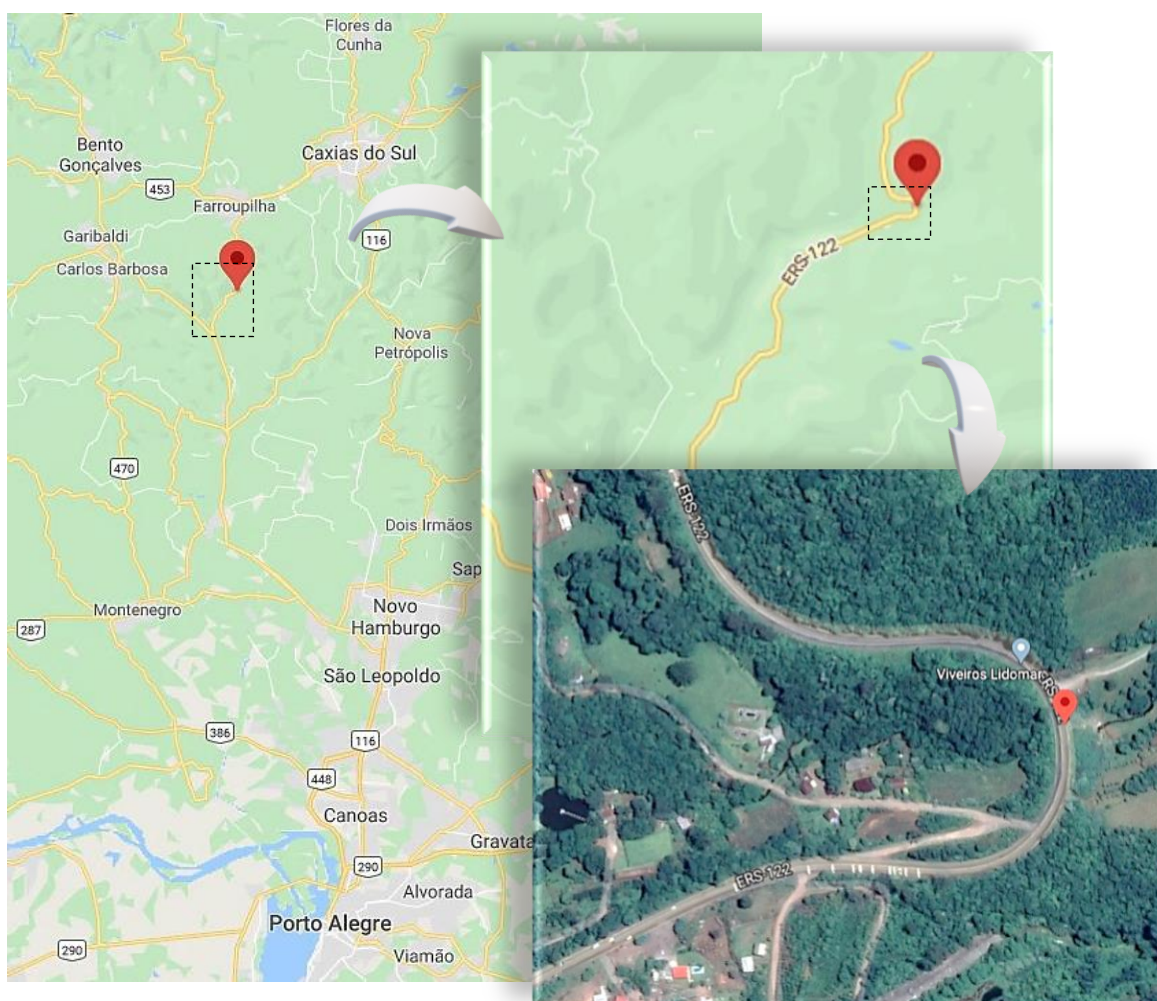
4.1 A Rodovia ERS-122 e a Curva do km 46+870

No estudo de caso analisou-se uma importante rodovia do sul do Brasil, em especial do Rio Grande do Sul, a ERS-122. Trata-se da principal rota de tráfego que une Porto Alegre (a capital do Estado) a Caxias do Sul (importante polo metalmeccânico do país), sendo estas as duas maiores cidades do RS segundo dados populacionais do IBGE (2018). A rodovia exerce papel fundamental para o escoamento da produção industrial, bem como para o

tráfego de turismo e transporte da produção vitivinícola de cidades da Serra Gaúcha, como Bento Gonçalves, Garibaldi, Farroupilha e Flores da Cunha.

Pelo fato de unir o planalto da região nordeste com a planície da região metropolitana de Porto Alegre, a rodovia é crítica para acidentes no trecho que percorre a escarpa do planalto, de aproximadamente 21km de extensão, entre Farroupilha (km 59+920) e São Vendelino (km 39+090) (DAER, 2020). Além de históricos de acidentes em função da alta sinuosidade e declividade longitudinal do trecho (ver Figura 13), escorregamentos de encosta ocorrem ocasionalmente devido à formação geológica e alto volume pluviométrico em especial no período de inverno, comum na região. Este trecho possui uma curva em particular que registra elevado índice de acidentes, infaustamente conhecida como “Curva da Morte”, localizada entre os quilômetros 47+070 e 46+670, com coordenadas 29°19'09.9"S 51°20'19.6"W (Figura 12).

Figura 12 – Mapa de localização da curva estudada



(fonte: GOOGLE MAPS, 2020)

Figura 13 – Sinalização vertical indicando sobre a periculosidade do trecho



(fonte: capturada pelo autor, no dia 30/04/2020)

Tendo em vista sua importância, o tráfego, em especial de veículos pesados carregados, é consideravelmente alto. Segundo dados levantados pelo DAER (2019), por meio do Relatório de Contagem e Classificação Volumétrica realizado entre os dias 20/02 e 26/02/2019 na saída da curva, o volume total de veículos que trafegam por dia no sentido de descida da serra (Farroupilha – São Vendelino) é em média 4577. Destes, 1217 (27%) são veículos de carga, entre os quais 489 (40%) são de carga pesada ou ultra pesada. Isso demonstra a importância do estudo da segurança ao tombamento destes veículos. O Relatório completo encontra-se no Anexo A.

Por se tratar de uma rodovia estadual, ela foi projetada de acordo com as Normas de Projetos Rodoviários (DAER, 1991), o qual a classifica como: Classe II; Região Montanhosa; $e_{max}=8\%$; $R_{min}=80m$; $Rampa_{max}=7\%$; $V_{projeto}=50km/h$. Segundo Passos (2019), o raio aproximado da curva é 100 metros (obtido por meio da análise do projeto geométrico com o software AutoCAD). Por razões técnicas e de segurança, a verificação *in loco* da superelevação existente foi impossibilitada, sendo, portanto, estimada pela Equação 6, adotando-se $e_{adot}=7,68\%$.

Como percebe-se na Figura 12, o trecho principal da curva apresenta um arco de aproximadamente 180° com comprimento de 314 m (para $R=100m$), solicitando que as condições de equilíbrio de forças se mantenham durante o desenvolvimento da curva por um considerável período de tempo (cerca de 22s, com $V=50km/h$), colaborando para uma análise quase-estática do limite de tombamento lateral. Sinalização vertical e experiências de tráfego confirmam que o trecho possui um longo e acentuado declive longitudinal, com cerca de 7km de extensão até a curva analisada, no sentido Farroupilha – São Vendelino.

Esse extenso declive, quando não respeitados os limites veiculares ou quando há má condução, pode levar à sobrecarga do sistema de frenagem de veículos pesados, causando perda de eficiência dos freios e, conseqüentemente, excesso de velocidade, principal condicionante do escorregamento e tombamento (tem influência exponencial no f_{dem} e na aceleração lateral). Apesar da curva também apresentar declividade longitudinal, não foi possível obtê-la por falta de dados do projeto e dificuldades de verificação *in loco*, não sendo diretamente determinante para o estudo do limite de tombamento lateral realizado neste trabalho, uma vez que não está incorporada no método utilizado.

Contudo, é importante assinalar que, conforme apresentado por Ejzenberg (2009, p.135), o greide produz um efeito de redução do atrito lateral máximo disponível. Isso decorre da frenagem/aceleração necessária para a manutenção da velocidade constante do veículo, o que consome parte do atrito disponível. Essa redução é pequena para greides da faixa de 4% a 12%, em função da reduzida frenagem/aceleração que a manutenção da velocidade requer, porém cresce com o aumento do greide e com o aumento da velocidade de projeto.

Uma evidência dos tombamentos ocorridos na curva são as cicatrizes presentes no pavimento da faixa do sentido contrário (de subida da serra), como pode ser visto na Figura 14 (a imagem mostra a região da marcação vermelha do mapa da Figura 12). Nota-se que a região da curva mostrada na Figura 14 é onde a maior parte dos acidentes ocorrem, também pela falta da defesa metálica, que pode ser vista apenas na extrema direita da foto.

Figura 14 – Cicatrizes no pavimento provocadas por tombamento de veículos



(fonte: capturada pelo autor, no dia 30/04/2020)

Experiências recorrentes de tráfego, no período de 2014 a 2020, permitiram concluir que a sinalização vertical e horizontal da curva nem sempre estava adequada, muitas vezes com pinturas de difícil visualização, bem como sinalizações verticais encobertas pela vegetação (Figura 15). Além das frequentes falhas no pavimento presentes na totalidade do trecho, que levam os condutores a realizarem manobras evasivas, críticas para o tombamento lateral.

Figura 15 – Sinalizações verticais obstruídas pela vegetação



(fonte: capturadas pelo autor, no dia 30/04/2020)

A discussão anterior permite identificar os principais motivos da insegurança em trechos de serra: longos e acentuados declives longitudinais que causam tendência de aumento da velocidade – por ação da gravidade ou por sobrecarga do sistema de frenagem –, e alta sinuosidade com raios pequenos. Esses fatores, aliados a veículos total ou excessivamente carregados e com baixa rigidez, criam o cenário ideal para a ocorrência de falha. Em particular, a curva estudada possui um fator agravante quando ocorre a saída de pista, que é o grande talude existente, como pode ser percebido na Figura 14, e que, visualmente, estima-se ter entre 15 e 20 metros de altura, fazendo com que o veículo, mesmo que não venha a tombar na pista, fatalmente tombe durante a queda, agravando o acidente.

O Comando Rodoviário da Brigada Militar do Rio Grande do Sul (CRBM, 2020) disponibiliza, em sua plataforma online, a consulta de dados dos acidentes ocorridos no Estado desde 2010 por rodovia e por quilômetro, tornando possível a elaboração do Quadro 4, de forma a situar o tombamento dentre todos os tipos de acidentes ocorridos na década de 2010 nos quilômetros 46 e 47, que abrangem a curva em questão. Ainda, o km 47 apresentou o maior número de acidentes por tombamento de toda a ERS-122 (41 acidentes), ficando na

7ª posição, de 172, dos quilômetros com maior número de acidentes totais registrados (146 acidentes).

Quadro 4 – Acidentes no período de 01/01/2010 a 31/12/2019 nos km 46 e 47 da ERS-122

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Década
Posição do tombamento em relação a todos tipos de acidentes*	2º	1º	2º	3º	2º	1º	2º	1º	1º	2º	2º
Acidentes por tombamento	4	11	6	4	4	7	1	4	2	1	44 (24%)
Total de acidentes registrados	18	26	28	25	29	25	5	13	6	9	184

*colisão, colisão frontal, colisão lateral, colisão traseira, choque, tombamento, capotamento, atropelamento, e outros tipos de acidentes.

(fonte: Adaptado de CRBM, 2020)

Dados disponibilizados diretamente pelo CRBM (2020), por intermédio do DAER, forneceram três acidentes ocorridos nesta curva no ano de 2019, que se encontram no Anexo B. Nos três casos os veículos saíram da pista, sendo que o caminhão 2 tombou ao lado da rodovia e o 3 tombou e sofreu queda no talude. Informações relevantes são os tipos e anos dos veículos – Mercedes Benz L1620, ano 1999, e ano 1997; e Volvo N12, ano 1986 – sendo que em todos os casos houve falha no sistema de freio, mostrando que a idade avançada da frota que está em circulação pode ser um fator contribuinte para a insegurança. Também, os dois casos que tombaram estavam carregados, sendo que o caminhão 3 estava com um carregamento de bois vivos, indicando que um provável deslocamento da carga tenha contribuído para a falha do veículo.

Uma vantagem da escolha desta curva para o estudo de caso deste trabalho é a informação do fator de atrito lateral fornecido pelo pavimento. Ele foi determinado por Passos (2019) a partir de uma verificação *in loco*, utilizando os ensaios de Mancha de Areia (macrotextura) e Pêndulo Britânico (microtextura – atrito). De acordo com Lugão (2008, p.63), o primeiro ensaio é um método volumétrico utilizado na determinação da profundidade média da altura da mancha de areia na superfície do pavimento. Já o segundo (Ibid., p.59) determina, por uma medida escalar, o grau de aderência entre pneu e pavimento, conhecido como coeficiente de atrito cinemático.

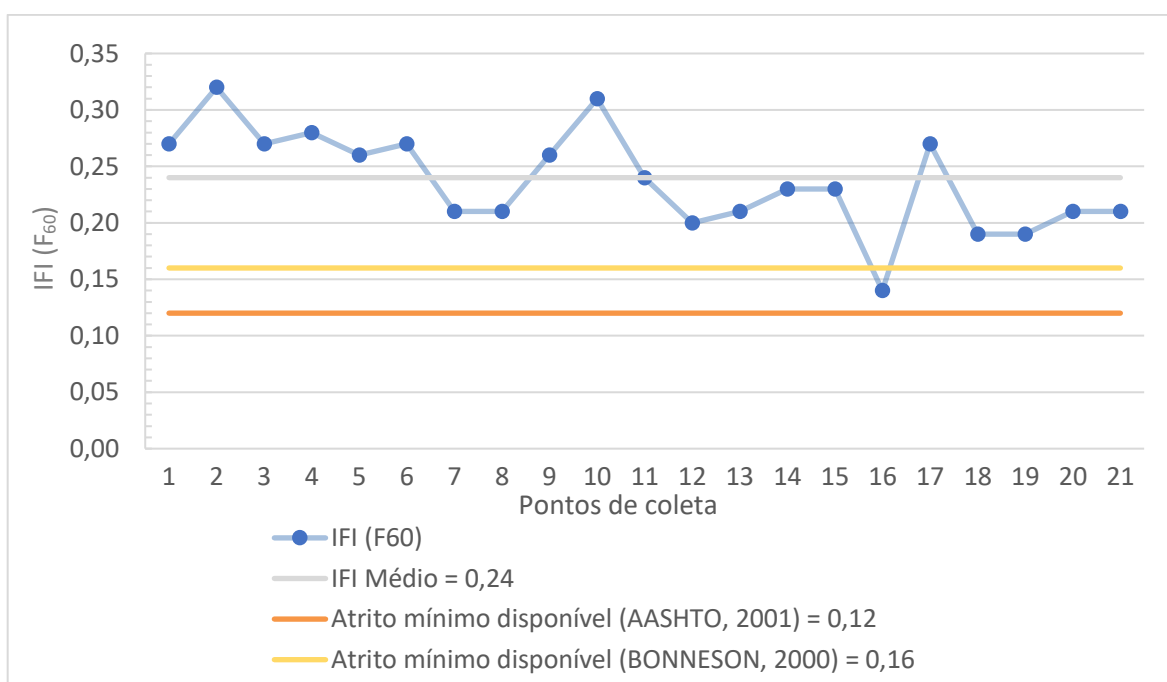
Passos (2019) coletou amostras a cada estaca de 20 metros, totalizando 21 coletas (entre os quilômetros 47+070 e 46+670) no sentido interior-capital, da descida da serra, por possuir fluxo mais intenso e maior taxa de acidentes. As coletas aconteceram no dia 09 de outubro de 2019, com auxílio do DAER, ajuda técnica do LAPAV/UFRGS, e planejamento logístico e de segurança da Polícia Rodoviária Estadual (PRE/RS). O levantamento foi

realizado no interior da curva, intercalando os dois ensaios – de atrito e de textura – e, por questões de segurança, foram tomados somente os valores no rodado direito, uma vez que os veículos passavam pelos pontos de coleta com metade da carroceria na faixa em análise e com a outra metade na faixa adicional separada pelos cones da PRE.

Os coeficientes de atrito das amostras foram determinados por meio do IFI (*International Friction Index*) – ASTM E-1960-07 (2015), o qual combina valores de microtextura (BPN, obtido com Pêndulo Britânico) e macrotextura (HS, obtido com Mancha de Areia), harmonizando um valor de aderência pneu-pavimento. É válido também para pavimentos molhados, já que combina valores de micro e macrotextura (PASSOS, 2019).

Seguindo os procedimentos normativos, Passos (2019) determinou os fatores de atrito (IFI) para as 21 amostras estudadas, conforme a Figura 16 abaixo. O limite mínimo de atrito que a rodovia deve fornecer (linha laranja) foi determinado pelo autor por meio da Equação 1 com $v = 50\text{km/h}$, $R = 100\text{m}$, $e = 7,68\%$, resultando em $f_{disp\ min} = 0,12$. Vale salientar que os fatores veicular (b_v) e de sobresterçamento (b_s) não foram incorporados nesse cálculo, pelo fato do autor basear-se na norma da AASHTO (2001). Incorporando-os, pela Equação 5, resultaria em $f_{disp\ min} = 0,16$. Para fins elucidativos e melhor visualização dos fatores de atrito que o pavimento oferece, tomou-se a liberdade de incluir na Figura 16 o coeficiente de atrito mínimo a ser ofertado considerando os fatores (b_v) e (b_s), representado pela linha amarela, e o fator de atrito médio de todas as coletas $f_{medio} = 0,24$ (linha cinza).

Figura 16 – Fatores de atrito na curva do km 46 da ERS-122



(fonte: Adaptado de PASSOS, 2019, p.42)

O atrito mínimo que o pavimento deve ofertar segundo a AASHTO (2001), na qual a norma brasileira é baseada, produz uma margem média de segurança ao escorregamento (MS_E) de 0,12 (0,24-0,12), uma vez que avalia o desempenho de automóveis para os cálculos. Nota-se, contudo, que a margem de segurança ao escorregamento de veículos pesados é bastante reduzida, obtendo-se o valor 0,08 (0,24-0,16). Pode-se concluir, com isso, que o atrito ofertado pelo pavimento deveria ser maior, a fim de proporcionar maior margem de segurança, tendo em vista que um pequeno acréscimo de velocidade já leva a MS_E a valores próximos de zero, como é demonstrado na seção 4.2.

A fim de comparação, os valores estimados por Bonneson (2000) na Tabela 1 para fatores de atrito lateral máximos disponíveis, para projetos com velocidade de 50km/h, resultam em valores médios de 0,45. O valor de pico registrado por Passos (2019) aconteceu na amostra 2 e resultou em 0,32. Isso demonstra que além dos fatores médios disponíveis estarem muito abaixo do recomendado pela literatura – 0,21 abaixo (0,45-0,24) –, a amostra com máximo atrito disponível está 0,13 abaixo do recomendado (0,45-0,32).

Com isso, conclui-se que apesar de todos os pontos apresentarem valores superiores ao limite mínimo de atrito disponível (0,12) definido pela norma AASHTO (2001), a amostra 16 (0,14) está abaixo do limite mínimo para veículos pesados (0,16), além do atrito médio disponível apresentar pequena margem de segurança ao escorregamento. Deve-se levar em consideração que apesar dos valores de atrito coletados servirem para condições de pavimento molhado (por incluírem a análise de macrotextura), o acúmulo de água na pista – devido a fortes chuvas ou à existência de poças d’água causadas por deformidades do pavimento –, bem como más condições de pneu reduzem o atrito disponível, reforçando a importância de uma MS_E maior.

Ainda, deve-se ter em mente o efeito do greide na redução do atrito lateral máximo disponível, decorrente da frenagem/aceleração para manutenção da velocidade. Essa redução é mais pronunciada com o aumento da velocidade e do greide, assim como em manobras evasivas, confirmando a necessidade de adoção de maiores margens de segurança ao escorregamento. A consideração de uma reserva mínima de atrito para frenagem, portanto, se mostra importante, sendo mais uma justificativa para a adoção do valor de 0,1 para as margens mínimas de segurança consideradas satisfatórias.

4.2 Simulações e Resultados

A fim de analisar a segurança de veículos pesados ao realizarem a curva estudada, foram simulados, na planilha de cálculo desenvolvida neste trabalho, 6 cenários aplicáveis a

veículos pesados não articulados e semirreboques/reboques, variando a velocidade, a posição do CG em relação à bitola, e o carregamento, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Cenários simulados para tombamento

Cenário	1	2	3	4	5	6
Excesso de Velocidade	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Posição Horizontal CG	1/2	1/2	1/3	1/2	1/2	1/3
Carga	Metade	Total	Metade	Metade	Total	Metade

(fonte: elaborada pelo autor)

O excesso de velocidade considerado foi de 7km/h, baseando-se na Resolução nº 396 do CONTRAN (BRASIL, 2011), que estabelece a diferença de 7 km/h para velocidades de até 100 km/h, e de 7% para velocidades superiores a 100 km/h, entre a velocidade medida pelos instrumentos de medição e a velocidade considerada para autuação do veículo. Logo, analisaram-se as velocidades de 50 km/h e 57 km/h.

As posições horizontais do CG em relação à bitola do veículo escolhidas para a análise foram 1/2 e 1/3. O primeiro caso simula o CG estando na metade da largura do veículo, como o modelo sugere. Já o segundo caso simula um deslocamento da carga (carga viva, solta, ou líquida, sem restrição de movimento e que acabaria se deslocando para um dos lados do veículo, por inércia, durante a curva), o que levaria o CG total do veículo a deslocar-se do meio para um terço da bitola. Essa última condição foi analisada somente com carregamento pela metade, partindo-se do pressuposto que caso o veículo estivesse completamente carregado o deslocamento da carga não ocorreria. E os carregamentos analisados foram: veículo totalmente carregado; e carregado pela metade. Desta forma, pode-se determinar o impacto que os veículos têm na margem de segurança ao tombamento lateral, quando carregados nos limites legais e parcialmente.

Para cada cenário, portanto, foi gerada uma planilha com os dados de entrada e saída. Os parâmetros de cálculo utilizados foram os determinados por padrão no Capítulo 3, adequando-se apenas o raio da curva (100 m) – por ser superior ao mínimo – e o atrito disponível (0,24) – coletado *in loco*. As 6 planilhas completas encontram-se no Apêndice. No Quadro 5, reuniram-se as principais informações para cada cenário estudado, facilitando a comparação e permitindo melhor compreensão.

Quadro 5 – Análise da segurança para cada cenário estudado

CENÁRIO		1		2		3		4		5		6	
Excesso de Velocidade		Não						Sim					
Posição Horizontal CG		1/2		1/2		1/3		1/2		1/2		1/3	
Carga		Metade		Total		Metade		Metade		Total		Metade	
Veículo - Rígido (R) ou Flexível (F)		R	F	R	F	R	F	R	F	R	F	R	F
VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	V_T	83	67	73	60	70	57	83	67	73	60	70	57
	MS_T	0,38	0,16	0,24	0,08	0,20	0,05	0,31	0,09	0,17	0,00	0,12	-0,01
SEMIRREBOQUES E REBOQUES	V_T	76	61	67	55	64	53	76	61	67	55	64	53
	MS_T	0,27	0,10	0,16	0,03	0,13	0,01	0,20	0,02	0,08	-0,04	0,05	-0,06
TODOS OS VEÍCULOS	V_E	57						57					
	MS_E	0,07						0,00					
SEGURANÇA GERAL	SG_{VPNA}	NÃO SEGURO											
	SG_{SR}	NÃO SEGURO											

(fonte: elaborada pelo autor)

A partir das informações do Quadro 5, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- Sob as mesmas condições (comparando cenários 1 e 4, 2 e 5, 3 e 6), as MS diminuem com o aumento da velocidade;
- Comparando veículos parcialmente e totalmente carregados (1 com 2, 4 com 5) as MS_T diminuem consideravelmente quanto maior for o carregamento;
- A posição do CG em 1/3 da bitola, mesmo com o carregamento pela metade, foi o que obteve menor MS_T , mostrando a importância da distribuição adequada e restrição de movimento da carga;
- A análise de veículo rígido apresenta resultados satisfatórios para quase todos os cenários, exceto para semirreboques nos cenários 5 e 6. Já para veículos que apresentam flexibilidade de suspensão, pneus e estrutura, as MS_T foram satisfatórias apenas para o cenário 1, com metade da capacidade total de carga, CG em 1/2 e sem excesso de velocidade;
- Veículos flexíveis, além de apresentarem margens insatisfatórias de segurança ao tombamento, com exceção do cenário 1, encontram-se na iminência do tombamento em alguns cenários (semirreboques no 3, e veículos pesados no 5), além de alguns, matematicamente, estarem em

processo de tombamento ou já tendo tombado, apresentando MS_T negativa (cenário 6 e semirreboques no 5);

- A velocidade de escorregamento é a mesma para todos os cenários, por depender de (f_{disp}) , (R) e (e) , constantes para todos os casos. Porém a MS_E é modificada em função da velocidade do veículo, fazendo com que assumisse o valor zero quando simulou-se excesso de velocidade. Isso implica em falha por escorregamento lateral do veículo antes que condições de tombamento com MS_T superiores a zero sejam atingidas;
- Analisando a segurança geral dos veículos, correspondente ao risco à falha, seja ela por tombamento ou escorregamento, conclui-se que em todos os cenários os veículos estão expostos a condições não seguras de trafegabilidade, uma vez que as MS_E apresentam valores inferiores a 0,1.

Uma alternativa para melhoria das condições de segurança seria o aumento do atrito lateral fornecido pelo pavimento, aumentando as MS_E . A fim de comparação, caso o atrito disponível fosse o recomendado pela Tabela 1 (0,45), os resultados de tombamento permaneceriam inalterados, porém para $V=50\text{km/h}$ a MS_E seria 0,28, e para $V=57\text{km/h}$ a MS_E seria 0,21, sendo a $V_E=73\text{km/h}$ para ambos casos. Com isso, as margens de segurança gerais seriam definidas pelas MS_T , uma vez que todas as MS_E apresentariam valores conformes (superiores a 0,2).

Para demonstrar essa condição hipotética de atrito disponível igual a 0,45, permitindo melhor visualização da segurança geral dos veículos nos 6 cenários estudados, elaborou-se o Quadro 6, a seguir, no qual as Seguranças Gerais são condicionadas pelas MS_T . Isso corrobora as conclusões de Harwood et al. (2003, apud EJZENBERG, 2009) de que, para situações usuais de pavimento seco, os caminhões geralmente têm limite de tombamento lateral inferior ao atrito lateral disponível pelo pavimento.

Quadro 6 – Análise da segurança para cada cenário estudado, com $f_{disp} = 0,45$

CENÁRIO		1		2		3		4		5		6	
Excesso de Velocidade		Não						Sim					
Posição Horizontal CG		1/2		1/2		1/3		1/2		1/2		1/3	
Carga		Metade		Total		Metade		Metade		Total		Metade	
Veículo - Rígido (R) ou Flexível (F)		R	F	R	F	R	F	R	F	R	F	R	F
VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	V_T	83	67	73	60	70	57	83	67	73	60	70	57
	MS_T	0,38	0,16	0,24	0,08	0,20	0,05	0,31	0,09	0,17	0,00	0,12	-0,01
SEMIRREBOQUES E REBOQUES	V_T	76	61	67	55	64	53	76	61	67	55	64	53
	MS_T	0,27	0,10	0,16	0,03	0,13	0,01	0,20	0,02	0,08	-0,04	0,05	-0,06
TODOS OS VEÍCULOS	V_E	73						73					
	MS_E	0,28						0,21					
SEGURANÇA GERAL*	SG_{VPNA}	S	PS	S	NS	S	NS	S	NS	PS	NS	PS	NS
	SG_{SR}	S	PS	PS	NS	PS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS

*Sendo: S = Seguro; PS = Parcialmente Seguro; NS = Não Seguro

(fonte: elaborada pelo autor)

5 Análise de Sensibilidade do Método Utilizado

Os seis cenários avaliados no estudo de caso propiciaram também uma verificação efetiva de como o método se comporta em situações limites, analisando-se a sensibilidade do mesmo frente às margens mínimas de segurança oferecidas pelas rodovias para veículos pesados. Para tanto, analisaram-se os dados de saída, obtidos por meio da planilha de cálculo, para cada Classe/Relevo de rodovia (Tabela 2), com os parâmetros padrão definidos no Capítulo 3, como a seguir desenvolvido.

5.1 Segurança ao Escorregamento

Simulando-se todas as combinações de Classe/Relevo da Tabela 2, utilizando os parâmetros limites de projeto nela definidos, e variando apenas a velocidade nos cenários com excesso, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A MS_E aumenta com a diminuição da velocidade de projeto (V_p), uma vez que menores V_p – apesar de permitirem raios menores, incrementando um pouco o atrito demandado – implicam em maiores fatores de atrito lateral disponíveis pelo pavimento. Isso é válido para projetos que, em função da baixa velocidade da rodovia, incrementem os fatores de atrito disponível conforme a Tabela 1;

- Para raios mínimos em diferentes classes e relevos que possuam a mesma velocidade de projeto, a MS_E é igual. Contudo, para uma mesma V_P , tanto maior será a MS_E quanto maior em relação ao mínimo o raio for;
- Comparando-se os f_{dem} obtidos com os f_{disp} da Tabela 1, a MS_E variou entre 0,13 e 0,26, demonstrando que as margens mínimas de segurança ao escorregamento que estão em zona conforme (acima de 0,2) são apenas para as Classes/Relevos com $V_P \leq 60$ km/h (1M, 2M, 3O, 3M, 4O e 4M). As demais margens são parcialmente conformes (entre 0,1 e 0,2);
- Com excesso de velocidade, comparando-se os f_{dem} obtidos com os f_{disp} da Tabela 1, a MS_E variou entre 0,08 e 0,15. Verificou-se que para as Classes/Relevos com $V_P \geq 100$ km/h (0P, 0O, 1P e 2P) as margens mínimas de segurança ao escorregamento com excesso de velocidade encontram-se na zona não conforme (menor que 0,1);

5.2 Segurança ao Tombamento

Utilizando-se os parâmetros padrão definidos no Capítulo 3, variando apenas a velocidade nos cenários com excesso, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- As MS_T para veículos rígidos assumem valores mínimos entre 0,10 e 0,25 em todas as Classes/Relevos, apenas com exceção da 3M para semirreboques, a qual apresentou MS_T não conforme de 0,09;
- As MS_T para veículos flexíveis (60% da rigidez ideal) assumem valores mínimos entre 0 e 0,09 para todas as Classes/Relevos, exceto para semirreboques com $V_P \leq 50$ km/h (2M, 3M, 4O e 4M), os quais apresentaram margens negativas entre -0,03 e -0,01, indicando estarem em processo de tombamento ou já tendo tombado. As margens mínimas ao tombamento lateral são, portanto, não conformes para todos veículos flexíveis lotados trafegando em curvas horizontais de raio mínimo, sendo negativas para semirreboques em curvas com $V_P \leq 50$ km/h;
- Com excesso de velocidade, as MS_T para veículos rígidos assumem valores mínimos entre 0 e 0,21 em todas as Classes/Relevos, apenas com exceção da 3M para semirreboques, a qual apresentou MS_T negativa de -0,02. Margens satisfatórias ($> 0,1$) para ambos veículos (pesados não articulados, e semirreboques) ocorreram apenas para $V_P \geq 100$ km/h (0P, 0O, 1P e 2P);

- Com excesso de velocidade, todas as MS_T para veículos flexíveis (60% da rigidez ideal) assumem valores não conformes ($< 0,1$), sendo todas negativas (entre $-0,15$ e 0), com exceção dos veículos pesados não articulados para $V_p \geq 100$ km/h (0P, 0O, 1P e 2P).
- Curvas de menor velocidade com maiores superelevações desfavorecem a segurança ao tombamento de veículos pesados, uma vez que permitem os menores raios, aumentando consideravelmente a aceleração lateral com pequeno excesso de velocidade.

6 Discussão dos Resultados

Com o estudo de caso foi possível verificar que as condições atuais da curva do km 46+870 da ERS-122 não são adequadas para garantir a segurança dos veículos pesados que por ali trafegam. Uma medida auxiliar seria o aumento do fator de atrito lateral disponível pelo pavimento, tornando a margem de segurança ao tombamento o fator determinante da segurança geral dos veículos. Porém o que efetivamente contribuiria para a redução dos acidentes por tombamento, em termos de via, seria um replanejamento do traçado da curva, com raio superior ao existente, uma vez que o tombamento lateral de veículos pesados é crítico em curvas horizontais de raios próximos aos mínimos, como também concluído por Ejzenberg (2009). A verificação *in loco* da superelevação existente na curva, bem como das velocidades operacionais efetivamente praticadas pelos veículos, também contribuiria para um prognóstico mais preciso.

Em termos de condutor e veículo, o que contribui para a redução dos acidentes por tombamento é o comportamento prudente por parte dos motoristas, mantendo-se atentos, evitando manobras tardias e evasivas. Deve-se conduzir na velocidade estipulada, usar freio motor em longos declives e não trafegar com excesso de carga, a fim de evitar a perda de eficiência do sistema de frenagem, que leva ao excesso de velocidade – fator determinante para falha por tombamento ou escorregamento.

Isso encontra sustentação nos estudos de Canale e Gutiérrez (2005), os quais apresentam o efeito *fading*, que é a diminuição acentuada do desempenho do sistema de freios de serviço pelo aumento excessivo da temperatura de seus componentes. Esse fenômeno ocorre quando o controle da velocidade de descida de veículos comerciais é realizado com uma excessiva aplicação dos freios de serviço, ou insuficiente ação dos sistemas auxiliares do motor (freio motor), ou da transmissão (retardadores), podendo levar

à perda do controle da velocidade ou à incapacidade de se realizar uma frenagem de emergência.

A utilização de frotas mais atuais, que possuam maior rigidez estrutural, estabilidade de suspensão e sistemas de segurança, também contribuem para segurança viária. Como identificado por Lucas e Widmer (2004, citado por EJZENBERG, 2009), o efeito *fading* nas rodovias brasileiras é agravado em função da elevada idade média da frota de veículos de carga, muitos deles fabricados sem dispositivos retardadores.

Os resultados obtidos com a análise de sensibilidade permitiram concluir que as margens mínimas de segurança ao escorregamento de veículos pesados, para todas as velocidades de projeto, são satisfatórias apenas se não houver excesso de velocidade. Já as margens mínimas de segurança ao tombamento podem ser consideradas satisfatórias, para todas as velocidades de projeto, apenas para veículos rígidos sem excesso de velocidade. De forma realista, em que veículos não são perfeitamente rígidos e que usualmente ocorrem excessos de velocidade, as margens mínimas de segurança ao tombamento lateral de veículos pesados são insatisfatórias e insuficientes. Os critérios usuais de projeto de curvas horizontais utilizados pelas normas não são, portanto, adequados para veículos pesados, os quais podem tombar antes que o limite de atrito lateral seja alcançado.

O excesso de velocidade tolerado de 7km/h – Resolução nº 396 do CONTRAN (BRASIL, 2011) –, por ser constante para velocidades de até 100km/h, provoca um aumento mais intenso da aceleração centrípeta nas curvas de baixa velocidade regulamentada. A fim de comparação, para uma rodovia de 80km/h – classe III, relevo plano, raio mínimo –, um excesso de 7km/h provoca, em um caminhão, um aumento de 18% na aceleração lateral. Já para uma curva com velocidade de 40km/h – classe III, relevo montanhoso, raio mínimo –, esse mesmo excesso provoca um acréscimo de 39% na aceleração lateral.

Isso ratifica as afirmações de Wormley et al. (2002, apud EJZENBERG, 2009) de que os fatores causais dos acidentes relacionados com o condutor partem do desconhecimento dos mecanismos de tombamento, dificultando a prevenção, uma vez que é uma incoerência, para condutores de veículos pesados, que tombamentos possam ocorrer em curvas realizadas em baixas velocidades.

Objeto de estudo pertinente seria a determinação de níveis mínimos de SRT obrigatórios, por meio de regulamentações do CONTRAN, a fim de garantir uma margem mínima de segurança ao tombamento para os veículos. Juntamente a isso, a revisão das alturas máximas permitidas para veículos de carga possibilitaria uma diminuição da altura do centro de gravidade dos mesmos, favorecendo a estabilidade veicular. Entretanto, caso a

alteração dos parâmetros rodoviários ou veiculares não seja possível, uma medida adequada é o estabelecimento de diferentes velocidades de projeto para distintas categorias de veículos, garantindo que veículos leves não escorreguem e veículos pesados não tombem em curvas horizontais.

7 Considerações Finais

Tendo em vista o número de vítimas e o impacto que os acidentes de trânsito têm nos custos à sociedade, como evidenciado pelos dados de acidentes verificados pelo IPEA (2015), entende-se a importância da análise da segurança, em particular de veículos de carga pesada, realizada neste trabalho. O desenvolvimento da metodologia utilizada, que permitiu a análise conjunta do tombamento e do escorregamento, levando em conta as características do veículo, da carga e da rodovia, possibilitou melhor compreensão das causas que levam esses veículos à falha.

Com os resultados obtidos, as margens de segurança gerais para veículos pesados se mostraram insatisfatórias para todos os cenários do estudo de caso e para a maior parte das condições limite estudadas na análise de sensibilidade. Por esse motivo, a análise do tombamento deveria ser incorporada nas normas de projetos rodoviários – AASHTO (2001), DNER (1999) e DNIT (2005) –, as quais restringem-se ao escorregamento do modelo ponto de massa baseado no conforto do usuário, admitindo, sem verificação, que o tombamento não ocorra.

Para trabalhos futuros, a análise dos efeitos da amplificação traseira em combinações de veículos de carga (CVC) é particularmente pertinente, tendo em vista o aumento da frota de veículos do tipo Rodotrem nas rodovias brasileiras. Complementarmente, veículos mais longos solicitam larguras de faixa superiores nas curvas, indicando a necessidade de adequação da superlargura em curvas horizontais de rodovias para comportar estes veículos.

Avaliar a influência do greide descendente na margem de segurança ao tombamento de veículos pesados, tratado de modo preliminar por Ejzenberg (2009) para semirreboques, assim como a influência do greide na redução do atrito lateral máximo disponível, em decorrência da frenagem/aceleração para manutenção da velocidade, também são importantes para estudos futuros. Em particular, a verificação das velocidades operacionais efetivamente praticadas pelos veículos no trecho do Estudo de Caso seria de grande valor para aproximar ainda mais as análises à realidade.

A planilha de cálculo desenvolvida neste trabalho, por permitir modificar a maior parte dos parâmetros de entrada, possibilita a realização de inúmeras simulações de cenários,

tornando-se uma interessante ferramenta de auxílio para os Departamentos de Trânsito. Esses, podem utilizá-la de forma complementar às normas de projeto em vigor, a fim de analisar a segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados em curvas de rodovias já existentes, bem como em novos projetos rodoviários.

Referências

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book)**. 4th ed. Washington, D.C., 2001.

BONNISON, J. A. **Superelevation distribution methods and transition designs**. Washington, D.C.: NCHRP – National Cooperative Highway Research Program/TRB – Transport Research Board, 2000. (Report 439).

BRASIL. Lei Federal nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 1997.

_____. Resolução CONTRAN nº 210, de 13 de novembro de 2006. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 2006.

_____. Resolução CONTRAN nº 396, de 13 de dezembro de 2011. Dispõe sobre requisitos técnicos mínimos para a fiscalização da velocidade de veículos automotores, reboques e semirreboques, conforme o Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 2011.

CANALE, A. C.; GUTIÉRREZ, J. C. H. **Estudo do desempenho da frenagem e do controle de velocidade de descida em declive longo e acentuado da serra do mar da rodovia dos imigrantes de veículos comerciais representativos da frota nacional**. São Carlos, SP, Brasil: EESC/USP – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

CRBM – Comando Rodoviário da Brigada Militar. **Brigada Militar**. Rio Grande do Sul, 2020. Estatísticas. Disponível em: <https://crbm.bm.rs.gov.br/resumo-de-acidentes/>. Acesso em: 24 jul. 2020.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **Normas de Projetos Rodoviários**. v. 1, Porto Alegre, RS, Brasil, fev. 1991.

_____. **Relatório de Contagem e Classificação Volumétrica**. Porto Alegre, RS, fev. 2019.

_____. **Sistema Rodoviário Estadual – SRE**, Porto Alegre, RS, maio 2020. Rodovias. Disponível em: <https://www.daer.rs.gov.br/sistema-rodoviario-estadual>. Acesso em: 24 jul. 2020.

DEARO, Guilherme. Os 20 países com mais mortes no trânsito (e os 20 com menos). **Exame**, 22 maio 2014. Mundo. Disponível em: <https://exame.com/mundo/os-20-paises-com-mais-mortes-no-transito-e-os-20-com-menos/>. Acesso em: 26 mar. 2020.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Rio de Janeiro, 1999. 195p. (IPR, Publ., 706).

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Projeto de Interseções**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2005. 528p. (IPR, Publ., 718).

_____. **Manual de Estudo de Tráfego**. Rio de Janeiro, 2006. 384 p. (IPR, Publ., 723).

_____. **Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas**. Rio de Janeiro, 2010. 392 p. (IPR. Publ.,740).

EJZENBERG, S. **Os Veículos Pesados e a Segurança no Projeto das Curvas Horizontais de Rodovias e Vias de Trânsito Rápido**. São Paulo, SP, Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 2009. 245p.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 7th ed. Warrendale, PA. Society of Automotive Engineers, 1992.

GOOGLE MAPS. ERS-122, Farroupilha. **Google**. c2020. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/29%C2%B019'09.9%22S+51%C2%B020'19.6%22W/@-29.2966816,-51.3918935,12z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-29.3194167!4d-51.3387778>. Acesso em: 23 jul. 2020.

IBGE divulga as estimativas de população dos municípios para 2018. **Agência IBGE Notícias**. 29 ago. 2018. Estatísticas sociais. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/22374-ibge-divulga-as-estimativas-de-populacao-dos-municipios-para-2018>. Acesso em: 18 jul. 2020

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: caracterização, tendências e custos para a sociedade**. Brasília, Brasil, 2015.

LAMM, R.; CHOUERI, E.; MAILAENDER, T. Side friction demand versus side friction assumed for curve design on two-lane rural highways. Washington, D.C. **Transportation Research Record**, v. 1303, p. 11-21, 1991.

LUGÃO, W. G. **Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, mar. 2008. 136p.

LUTZ, R. **A comparison of friction supply, friction demand, and maximum design friction on sharp horizontal curves with steep grades**. PA, USA: Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, Schreyer Honors College. 2013. 90 p.

MELO, Rubem Penteado de. A Regra 80/20 para os tanques. **LinkedIn**, 13 ago. 2018. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/regra-8020-para-os-tanques-eng-rubem-penteado-de-melo-dsc-/?published=t>. Acesso em: 20 jun. 2020.

MEYER, Alberto. Análise da Susceptibilidade a Tombamento em Caminhões e Ônibus. **LinkedIn**, 26 jun. 2019. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/analise-da-susceptibilidade-tombamento-em-caminh%C3%B5es-e-alberto-meyer/>. Acesso em: 20 jun. 2020.

PASSOS, P. H. **Estudo Sobre a Influência das Condições do Pavimento no Coeficiente de Atrito Lateral de Curvas Horizontais – Estudo de Caso da Curva de km 46 da ERS-122**. Porto Alegre, RS: Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. dez. 2019, 46 p.

RADIMSKY, M.; MATUSZKOVA, R.; BUDIK, O. Relationship between horizontal curves design and accident rate. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 5–2, 8 maio 2016.

RANDON. **Visauto**. c2020. Produtos/Randon/Semirreboque. Disponível em: <https://visauto.co.ao/pt/produutos/randon>. Acesso em: 30 jun. 2020.

REV GROUP. Tilt Table. **Ferrara Fire**, 2019. Disponível em: <https://www.ferrarafire.com/safety/tilt-table/>. Acesso em: 01 jul. 2020.

STABELINI, Delton. Tipos de caminhões e capacidades: veja o ideal para sua carga. **Texaco**. c2017. Disponível em: <https://blog.texaco.com.br/ursa/tipos-de-caminhoes-e-capacidades/>. Acesso em: 04 jul. 2020.

TREAT, J.; TUMBAS N. S.; MCDONALD S. T.; SHINAR D.; HUME R. D.; MAYER R. E.; STANSIFER R. L.; CASTELLAN N. J. **Tri-level study of the causes of traffic accidents**. Executive summary. *Vision Research*. v. 42, n. 21, p. 2419–2430, 1979.

UNITED NATIONS. **Global Plan for The Decade of Action for Road Safety 2011-2020**, v. 3, 2011. Disponível em: https://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/global_plan_decade.pdf. Acesso em: 25 mar. 2020.

WINKLER, C. B. Rollover of heavy commercial vehicles. **UMTRI Research Review**, Ann Arbor, Michigan, v. 31, n. 4, Oct./Dec. 2000.

WINKLER, C. B.; ERVIN, R. D. **Rollover of heavy commercial vehicles UMTRI-99-19**. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Transportation Research Institute, 1999.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global status report on road safety**. Genebra, Suíça: Organização das Nações Unidas, 2018.

**APÊNDICE – PLANILHAS DE ANÁLISE DA SEGURANÇA PARA OS SEIS
CENÁRIOS ESTUDADOS**

CENÁRIO 1

Verificação do Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT - <i>Static Rollover Threshold</i>) e Margem de Segurança (MS) para veículos de carga em curvas					
DADOS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE CÁLCULO	DADOS DE SAÍDA	VEÍCULO RÍGIDO	VEÍCULO FLEXÍVEL
Classe e Relevo da rodovia		2M	2M	VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	
Raio da Curva [m]	100	100	Largura CG [m]	0,95	0,95
Coeficiente de Atrito Lateral Máximo Disponível (f_{disp}) [adim.]	0,24	0,24	Altura CG (h) [m]	1,73	1,73
Superelevação Adotada (e_{adot}) [%]		7,68%	SRT _{geom} [g]	0,55	0,33
Velocidade Adotada (V_{adot}) [km/h]		50	SRT _e [g]	0,63	0,41
Bitola (t) [m]		1,90	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
Posição horizontal do CG em relação à bitola [adim]		0,50	V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	83	67
Fator de calibração (b_r) [adim.]		0,60	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,38	0,16
¹ Raio Mínimo [m]		80	SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
¹ Coeficiente de Atrito Transversal Máximo de Projeto ($f_{máx}$) [adim.]		0,16	Largura CG [m]	0,95	0,95
¹ Superelevação Máxima ($e_{máx}$) [%]		8%	Altura CG (h) [m]	2,15	2,15
¹ Velocidade de Projeto [km/h]		50	SRT _{geom} [g]	0,44	0,27
Superelevação Reduzida (e_{reduz}) [%] - para raios acima dos mínimos		7,68%	SRT _e [g]	0,52	0,34
Coeficiente de Atrito Lateral Demandado (f_{dem}) [adim.]		0,16	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
CENTRO DE GRAVIDADE PARA VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS			V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	76	61
Altura CG veículo (h_v) [m]		1,40	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,27	0,10
Altura CG carga (h_c) [m]	2,15	2,15	V_E [km/h] - Velocidade de escorregamento lateral	57	
Massa veículo (m_v) [toneladas]		9,00	³ Margem de Segurança ao Escorregamento (MS_E) [g]	0,07	
Massa carga (m_c) [toneladas]	7,00	7,00	⁴ SEGURANÇA GERAL VEÍCULOS PESADOS (SG_{VPNA}) NÃO SEGURO NÃO SEGURO		
CENTRO DE GRAVIDADE PARA SEMIRREBOQUES E REBOQUES			⁴ SEGURANÇA GERAL SEMIRREBOQUES (SG_{SR}) NÃO SEGURO NÃO SEGURO		
Altura base carga (h_{base}) [m]		1,40	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> Planilha de análise da segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados, desenvolvida por César Viapiana, UFRGS, 2020 </div> Rodovia: ERS-122 Trecho: 122ERS0070 - Entr. ERS-446 (São Vendelino) - Entr. RSC-453 (Farroupilha) Subtrecho: Curva do km 46+870 Data: ago/2020		
Altura total semirreboque (h_{total}) [m]	2,90	2,90			
¹ Caso o trecho estudado possua algum desses parâmetros diferente da Norma DNER 1999, preencha o valor a ser utilizado, no campo à direita					
² Margem de Segurança ao Tombamento:					
Conforme (acima de 0,2)					
Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)					
Não conforme (Alto risco de tombamento - abaixo de 0,1)					
³ Margem de Segurança ao Escorregamento:					
Conforme (acima de 0,2)					
Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)					
Não conforme (Alto risco de escorregamento - abaixo de 0,1)					
⁴ Segurança Geral:					
Seguro (MS _E e MS _T acima de 0,2)					
Parcialmente Seguro (Alguma MS entre 0,1 e 0,2, e nenhuma abaixo de 0,1)					
Não Seguro (Alguma MS abaixo de 0,1)					

CENÁRIO 2

Verificação do Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT - <i>Static Rollover Threshold</i>) e Margem de Segurança (MS) para veículos de carga em curvas					
DADOS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE CÁLCULO	DADOS DE SAÍDA	VEÍCULO RÍGIDO	VEÍCULO FLEXÍVEL
Classe e Relevo da rodovia		2M	2M	VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	
Raio da Curva [m]	100	100	Largura CG [m]	0,95	0,95
Coeficiente de Atrito Lateral Máximo Disponível (f_{disp}) [adim.]	0,24	0,24	Altura CG (h) [m]	2,31	2,31
Superelevação Adotada (e_{adot}) [%]		7,68%	SRT _{geom} [g]	0,41	0,25
Velocidade Adotada (V_{adot}) [km/h]		50	SRT _e [g]	0,49	0,32
Bitola (t) [m]		1,90	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
Posição horizontal do CG em relação à bitola [adim]		0,50	V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	73	60
Fator de calibração (b_r) [adim.]		0,60	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,24	0,08
¹ Raio Mínimo [m]		80	SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
¹ Coeficiente de Atrito Transversal Máximo de Projeto ($f_{máx}$) [adim.]		0,16	Largura CG [m]	0,95	0,95
¹ Superelevação Máxima ($e_{máx}$) [%]		8%	Altura CG (h) [m]	2,90	2,90
¹ Velocidade de Projeto [km/h]		50	SRT _{geom} [g]	0,33	0,20
Superelevação Reduzida (e_{reduz}) [%] - para raios acima dos mínimos		7,68%	SRT _e [g]	0,40	0,27
Coeficiente de Atrito Lateral Demandado (f_{dem}) [adim.]		0,16	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
CENTRO DE GRAVIDADE PARA VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS			V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	67	55
Altura CG veículo (h_v) [m]		1,40	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,16	0,03
Altura CG carga (h_c) [m]		2,90	V_E [km/h] - Velocidade de escorregamento lateral	57	
Massa veículo (m_v) [toneladas]		9,00	³ Margem de Segurança ao Escorregamento (MS_E) [g]	0,07	
Massa carga (m_c) [toneladas]		14,00	⁴ SEGURANÇA GERAL VEÍCULOS PESADOS (SG_{VPNA})		
CENTRO DE GRAVIDADE PARA SEMIRREBOQUES E REBOQUES			⁴ SEGURANÇA GERAL SEMIRREBOQUES (SG_{SR})		
Altura base carga (h_{base}) [m]		1,40	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO
Altura total semirreboque (h_{total}) [m]		4,40	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO
¹ Caso o trecho estudado possua algum desses parâmetros diferente da Norma DNER 1999, preencha o valor a ser utilizado, no campo à direita					
² Margem de Segurança ao Tombamento:					
Conforme (acima de 0,2)					
Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)					
Não conforme (Alto risco de tombamento - abaixo de 0,1)					
³ Margem de Segurança ao Escorregamento:					
Conforme (acima de 0,2)					
Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)					
Não conforme (Alto risco de escorregamento - abaixo de 0,1)					
⁴ Segurança Geral:					
Seguro (MS _E e MS _T acima de 0,2)					
Parcialmente Seguro (Alguma MS entre 0,1 e 0,2, e nenhuma abaixo de 0,1)					
Não Seguro (Alguma MS abaixo de 0,1)					
			Planilha de análise da segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados, desenvolvida por César Viapiana, UFRGS, 2020		
			Rodovia: ERS-122 Trecho: 122ERS0070 - Entr. ERS-446 (São Vendelino) - Entr. RSC-453 (Farroupilha) Subtrecho: Curva do km 46+870 Data: ago/2020		

CENÁRIO 3

Verificação do Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT - <i>Static Rollover Threshold</i>) e Margem de Segurança (MS) para veículos de carga em curvas					
DADOS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE CÁLCULO	DADOS DE SAÍDA	VEÍCULO RÍGIDO	VEÍCULO FLEXÍVEL
Classe e Relevo da rodovia		2M	2M	VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	
Raio da Curva [m]	100	100	Largura CG [m]	0,63	0,63
Coeficiente de Atrito Lateral Máximo Disponível (f_{disp}) [adim.]	0,24	0,24	Altura CG (h) [m]	1,73	1,73
Superelevação Adotada (e_{adot}) [%]		7,68%	SRT _{geom} [g]	0,37	0,22
Velocidade Adotada (V_{adot}) [km/h]		50	SRT _e [g]	0,44	0,30
Bitola (t) [m]		1,90	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
Posição horizontal do CG em relação à bitola [adim.]	0,33	0,33	V_r [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	70	57
Fator de calibração (b_r) [adim.]		0,60	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,20	0,05
¹ Raio Mínimo [m]		80	SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
¹ Coeficiente de Atrito Transversal Máximo de Projeto ($f_{máx}$) [adim.]		0,16	Largura CG [m]	0,63	0,63
¹ Superelevação Máxima ($e_{máx}$) [%]		8%	Altura CG (h) [m]	2,15	2,15
¹ Velocidade de Projeto [km/h]		50	SRT _{geom} [g]	0,29	0,18
Superelevação Reduzida (e_{reduz}) [%] - para raios acima dos mínimos		7,68%	SRT _e [g]	0,37	0,25
Coeficiente de Atrito Lateral Demandado (f_{dem}) [adim.]		0,16	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,24	0,24
CENTRO DE GRAVIDADE PARA VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS			V_r [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	64	53
Altura CG veículo (h_v) [m]		1,40	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,13	0,01
Altura CG carga (h_c) [m]	2,15	2,15	V_E [km/h] - Velocidade de escorregamento lateral	57	
Massa veículo (m_v) [toneladas]		9,00	³ Margem de Segurança ao Escorregamento (MS_E) [g]	0,07	
Massa carga (m_c) [toneladas]	7,00	7,00	⁴ SEGURANÇA GERAL VEÍCULOS PESADOS (SG_{VPNA}) NÃO SEGURO NÃO SEGURO		
CENTRO DE GRAVIDADE PARA SEMIRREBOQUES E REBOQUES			⁴ SEGURANÇA GERAL SEMIRREBOQUES (SG_{SR}) NÃO SEGURO NÃO SEGURO		
Altura base carga (h_{base}) [m]		1,40	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> Planilha de análise da segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados, desenvolvida por César Viapiana, UFRGS, 2020 </div> Rodovia: ERS-122 Trecho: 122ERS0070 - Entr. ERS-446 (São Vendelino) - Entr. RSC-453 (Farroupilha) Subtrecho: Curva do km 46+870 Data: ago/2020		
Altura total semirreboque (h_{total}) [m]	2,90	2,90			
¹ Caso o trecho estudado possua algum desses parâmetros diferente da Norma DNER 1999, preencha o valor a ser utilizado, no campo à direita					
² Margem de Segurança ao Tombamento:					
<div style="background-color: #C8E6C9; padding: 2px;">Conforme (acima de 0,2)</div> <div style="background-color: #FFCCBC; padding: 2px;">Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)</div> <div style="background-color: #FFCDD2; padding: 2px;">Não conforme (Alto risco de tombamento - abaixo de 0,1)</div>					
³ Margem de Segurança ao Escorregamento:					
<div style="background-color: #C8E6C9; padding: 2px;">Conforme (acima de 0,2)</div> <div style="background-color: #FFCCBC; padding: 2px;">Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)</div> <div style="background-color: #FFCDD2; padding: 2px;">Não conforme (Alto risco de escorregamento - abaixo de 0,1)</div>					
⁴ Segurança Geral:					
<div style="background-color: #C8E6C9; padding: 2px;">Seguro (MS_E e MS_T acima de 0,2)</div> <div style="background-color: #FFCCBC; padding: 2px;">Parcialmente Seguro (Alguma MS entre 0,1 e 0,2, e nenhuma abaixo de 0,1)</div> <div style="background-color: #FFCDD2; padding: 2px;">Não Seguro (Alguma MS abaixo de 0,1)</div>					

CENÁRIO 4

Verificação do Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT - <i>Static Rollover Threshold</i>) e Margem de Segurança (MS) para veículos de carga em curvas					
DADOS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE CÁLCULO	DADOS DE SAÍDA	VEÍCULO RÍGIDO	VEÍCULO FLEXÍVEL
Classe e Relevo da rodovia		2M	2M	VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	
Raio da Curva [m]	100	100	Largura CG [m]	0,95	0,95
Coeficiente de Atrito Lateral Máximo Disponível (f_{disp}) [adim.]	0,24	0,24	Altura CG (h) [m]	1,73	1,73
Superelevação Adotada (e_{adot}) [%]		7,68%	SRT _{geom} [g]	0,55	0,33
Velocidade Adotada (V_{adot}) [km/h]	57	57	SRT _e [g]	0,63	0,41
Bitola (t) [m]		1,90	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,32	0,32
Posição horizontal do CG em relação à bitola [adim]		0,50	V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	83	67
Fator de calibração (b_r) [adim.]		0,60	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,31	0,09
¹ Raio Mínimo [m]		80	SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
¹ Coeficiente de Atrito Transversal Máximo de Projeto ($f_{máx}$) [adim.]		0,16	Largura CG [m]	0,95	0,95
¹ Superelevação Máxima ($e_{máx}$) [%]		8%	Altura CG (h) [m]	2,15	2,15
¹ Velocidade de Projeto [km/h]		50	SRT _{geom} [g]	0,44	0,27
Superelevação Reduzida (e_{reduz}) [%] - para raios acima dos mínimos		7,68%	SRT _e [g]	0,52	0,34
Coeficiente de Atrito Lateral Demandado (f_{dem}) [adim.]		0,24	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,32	0,32
CENTRO DE GRAVIDADE PARA VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS			V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	76	61
Altura CG veículo (h_v) [m]		1,40	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,20	0,02
Altura CG carga (h_c) [m]	2,15	2,15	V_E [km/h] - Velocidade de escorregamento lateral	57	
Massa veículo (m_v) [toneladas]		9,00	³ Margem de Segurança ao Escorregamento (MS_E) [g]	0,00	
Massa carga (m_c) [toneladas]	7,00	7,00	⁴ SEGURANÇA GERAL VEÍCULOS PESADOS (SG_{VPNA})		
CENTRO DE GRAVIDADE PARA SEMIRREBOQUES E REBOQUES			⁴ SEGURANÇA GERAL SEMIRREBOQUES (SG_{SR})		
Altura base carga (h_{base}) [m]		1,40	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO
Altura total semirreboque (h_{total}) [m]	2,90	2,90	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO
<p>¹ Caso o trecho estudado possua algum desses parâmetros diferente da Norma DNER 1999, preencha o valor a ser utilizado, no campo à direita</p> <p style="text-align: center;">² Margem de Segurança ao Tombamento:</p> <p style="text-align: center;">Conforme (acima de 0,2)</p> <p style="text-align: center;">Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)</p> <p style="text-align: center;">Não conforme (Alto risco de tombamento - abaixo de 0,1)</p> <p style="text-align: center;">³ Margem de Segurança ao Escorregamento:</p> <p style="text-align: center;">Conforme (acima de 0,2)</p> <p style="text-align: center;">Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)</p> <p style="text-align: center;">Não conforme (Alto risco de escorregamento - abaixo de 0,1)</p> <p style="text-align: center;">⁴ Segurança Geral:</p> <p style="text-align: center;">Seguro (MS_E e MS_T acima de 0,2)</p> <p style="text-align: center;">Parcialmente Seguro (Alguma MS entre 0,1 e 0,2, e nenhuma abaixo de 0,1)</p> <p style="text-align: center;">Não Seguro (Alguma MS abaixo de 0,1)</p>					
			<p style="text-align: center;">Planilha de análise da segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados, desenvolvida por César Viapiana, UFRGS, 2020</p> <p>Rodovia: ERS-122</p> <p>Trecho: 122ERS0070 - Entr. ERS-446 (São Vendelino) - Entr. RSC-453 (Farroupilha)</p> <p>Subtrecho: Curva do km 46+870</p> <p>Data: ago/2020</p>		

CENÁRIO 5

Verificação do Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT - <i>Static Rollover Threshold</i>) e Margem de Segurança (MS) para veículos de carga em curvas					
DADOS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE CÁLCULO	DADOS DE SAÍDA	VEÍCULO RÍGIDO	VEÍCULO FLEXÍVEL
Classe e Relevo da rodovia		2M	2M	VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	
Raio da Curva [m]	100	100	Largura CG [m]	0,95	0,95
Coeficiente de Atrito Lateral Máximo Disponível (f_{disp}) [adim.]	0,24	0,24	Altura CG (h) [m]	2,31	2,31
Superelevação Adotada (e_{adot}) [%]		7,68%	SRT _{geom} [g]	0,41	0,25
Velocidade Adotada (V_{adot}) [km/h]	57	57	SRT _e [g]	0,49	0,32
Bitola (t) [m]		1,90	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,32	0,32
Posição horizontal do CG em relação à bitola [adim]		0,50	V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	73	60
Fator de calibração (b_r) [adim.]		0,60	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,17	0,00
¹ Raio Mínimo [m]		80	SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
¹ Coeficiente de Atrito Transversal Máximo de Projeto ($f_{máx}$) [adim.]		0,16	Largura CG [m]	0,95	0,95
¹ Superelevação Máxima ($e_{máx}$) [%]		8%	Altura CG (h) [m]	2,90	2,90
¹ Velocidade de Projeto [km/h]		50	SRT _{geom} [g]	0,33	0,20
Superelevação Reduzida (e_{reduz}) [%] - para raios acima dos mínimos		7,68%	SRT _e [g]	0,40	0,27
Coeficiente de Atrito Lateral Demandado (f_{dem}) [adim.]		0,24	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,32	0,32
CENTRO DE GRAVIDADE PARA VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS			V_T [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	67	55
Altura CG veículo (h_v) [m]		1,40	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,08	-0,04
Altura CG carga (h_c) [m]		2,90	V_E [km/h] - Velocidade de escorregamento lateral	57	
Massa veículo (m_v) [toneladas]		9,00	³ Margem de Segurança ao Escorregamento (MS_E) [g]	0,00	
Massa carga (m_c) [toneladas]		14,00	⁴ SEGURANÇA GERAL VEÍCULOS PESADOS (SG_{VPNA})		
CENTRO DE GRAVIDADE PARA SEMIRREBOQUES E REBOQUES			⁴ SEGURANÇA GERAL SEMIRREBOQUES (SG_{SR})		
Altura base carga (h_{base}) [m]		1,40	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO
Altura total semirreboque (h_{total}) [m]		4,40	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO
<p>¹ Caso o trecho estudado possua algum desses parâmetros diferente da Norma DNER 1999, preencha o valor a ser utilizado, no campo à direita</p> <p style="text-align: center;">² Margem de Segurança ao Tombamento:</p> <p style="text-align: center; color: green;">Conforme (acima de 0,2)</p> <p style="text-align: center; color: orange;">Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)</p> <p style="text-align: center; color: red;">Não conforme (Alto risco de tombamento - abaixo de 0,1)</p> <p style="text-align: center;">³ Margem de Segurança ao Escorregamento:</p> <p style="text-align: center; color: green;">Conforme (acima de 0,2)</p> <p style="text-align: center; color: orange;">Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)</p> <p style="text-align: center; color: red;">Não conforme (Alto risco de escorregamento - abaixo de 0,1)</p> <p style="text-align: center;">⁴ Segurança Geral:</p> <p style="text-align: center; color: green;">Seguro (MS_E e MS_T acima de 0,2)</p> <p style="text-align: center; color: orange;">Parcialmente Seguro (Alguma MS entre 0,1 e 0,2, e nenhuma abaixo de 0,1)</p> <p style="text-align: center; color: red;">Não Seguro (Alguma MS abaixo de 0,1)</p>					
			<p style="text-align: center;">Planilha de análise da segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados, desenvolvida por César Viapiana, UFRGS, 2020</p> <p>Rodovia: ERS-122</p> <p>Trecho: 122ERS0070 - Entr. ERS-446 (São Vendelino) - Entr. RSC-453 (Farroupilha)</p> <p>Subtrecho: Curva do km 46+870</p> <p>Data: ago/2020</p>		

CENÁRIO 6

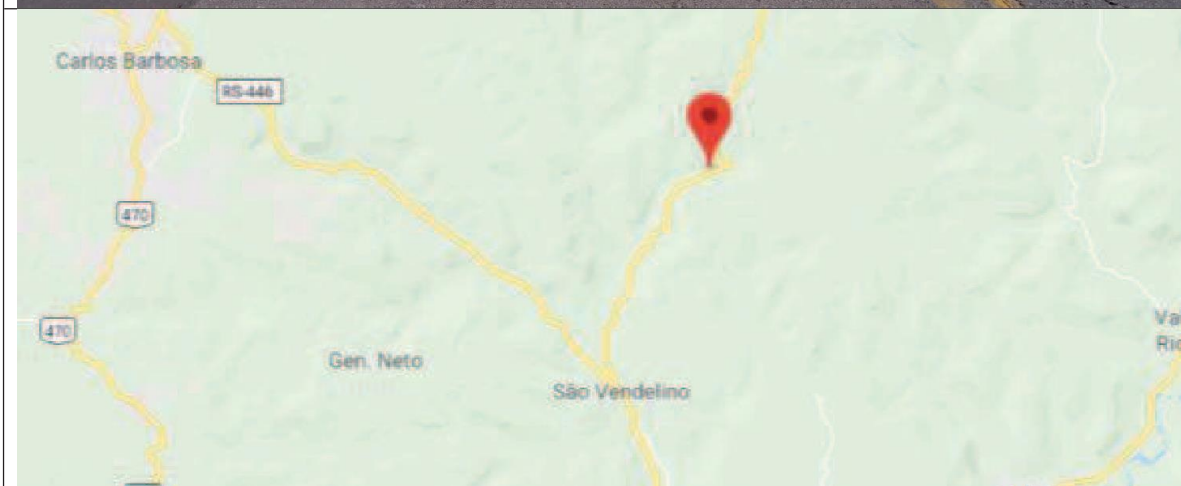
Verificação do Limite de Tombamento Lateral Estático (SRT - <i>Static Rollover Threshold</i>) e Margem de Segurança (MS) para veículos de carga em curvas					
DADOS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE CÁLCULO	DADOS DE SAÍDA	VEÍCULO RÍGIDO	VEÍCULO FLEXÍVEL
Classe e Relevo da rodovia		2M	2M	VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS	
Raio da Curva [m]	100	100	Largura CG [m]	0,63	0,63
Coeficiente de Atrito Lateral Máximo Disponível (f_{disp}) [adim.]	0,24	0,24	Altura CG (h) [m]	1,73	1,73
Superelevação Adotada (e_{adot}) [%]		7,68%	SRT _{geom} [g]	0,37	0,22
Velocidade Adotada (V_{adot}) [km/h]	57	57	SRT _e [g]	0,44	0,30
Bitola (t) [m]		1,90	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,32	0,32
Posição horizontal do CG em relação à bitola [adim]	0,33	0,33	V_r [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	70	57
Fator de calibração (b_r) [adim.]		0,60	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,12	-0,01
¹ Raio Mínimo [m]		80	SEMIRREBOQUES E REBOQUES		
¹ Coeficiente de Atrito Transversal Máximo de Projeto ($f_{máx}$) [adim.]		0,16	Largura CG [m]	0,63	0,63
¹ Superelevação Máxima ($e_{máx}$) [%]		8%	Altura CG (h) [m]	2,15	2,15
¹ Velocidade de Projeto [km/h]		50	SRT _{geom} [g]	0,29	0,18
Superelevação Reduzida (e_{reduz}) [%] - para raios acima dos mínimos		7,68%	SRT _e [g]	0,37	0,25
Coeficiente de Atrito Lateral Demandado (f_{dem}) [adim.]		0,24	Aceleração lateral atuante (a_{yat}) [g]	0,32	0,32
CENTRO DE GRAVIDADE PARA VEÍCULOS PESADOS NÃO ARTICULADOS			V_r [km/h] - Velocidade de tombamento lateral	64	53
Altura CG veículo (h_v) [m]		1,40	² Margem de Segurança ao Tombamento (MS_T) [g]	0,05	-0,06
Altura CG carga (h_c) [m]	2,15	2,15	V_E [km/h] - Velocidade de escorregamento lateral	57	
Massa veículo (m_v) [toneladas]		9,00	³ Margem de Segurança ao Escorregamento (MS_E) [g]	0,00	
Massa carga (m_c) [toneladas]	7,00	7,00	⁴ SEGURANÇA GERAL VEÍCULOS PESADOS (SG_{VPNA})		
CENTRO DE GRAVIDADE PARA SEMIRREBOQUES E REBOQUES			⁴ SEGURANÇA GERAL SEMIRREBOQUES (SG_{SR})		
Altura base carga (h_{base}) [m]		1,40	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	
Altura total semirreboque (h_{total}) [m]	2,90	2,90	NÃO SEGURO	NÃO SEGURO	
¹ Caso o trecho estudado possua algum desses parâmetros diferente da Norma DNER 1999, preencha o valor a ser utilizado, no campo à direita					
² Margem de Segurança ao Tombamento:					
Conforme (acima de 0,2)					
Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)					
Não conforme (Alto risco de tombamento - abaixo de 0,1)					
³ Margem de Segurança ao Escorregamento:					
Conforme (acima de 0,2)					
Parcialmente conforme (entre 0,1 e 0,2)					
Não conforme (Alto risco de escorregamento - abaixo de 0,1)					
⁴ Segurança Geral:					
Seguro (MS_E e MS_T acima de 0,2)					
Parcialmente Seguro (Alguma MS entre 0,1 e 0,2, e nenhuma abaixo de 0,1)					
Não Seguro (Alguma MS abaixo de 0,1)					
			Planilha de análise da segurança ao tombamento e escorregamento de veículos pesados, desenvolvida por César Viapiana, UFRGS, 2020		
			Rodovia: ERS-122 Trecho: 122ERS0070 - Entr. ERS-446 (São Vendelino) - Entr. RSC-453 (Farroupilha) Subtrecho: Curva do km 46+870 Data: ago/2020		

**ANEXO A – RELATÓRIO DE CONTAGEM E CLASSIFICAÇÃO VOLUMÉTRICA
DO KM 46 DA ERS-122**

Posto: Código 122ERS0070

Rodovia: ERS-122		Código do SRE: 122ERS0070	
Trecho inicial:	ENTR. ERS-446 (B) (P/ SÃO VENDELINO)		
Trecho final:	ENTR. RSC-453 (A) (P/ FARROUPILHA)		
Nome SR:	Bento Gonçalves		
Latitude:	-29.32164000	Longitude:	-51.34428000
Marco (Km):	46.290	Elevação(m):	351

Tipo de Posto:	Anual	Equipamento:	Pneumático
Data da Instalação:	19/02/2019	Nº de Série:	677/671
Tempo de Contagem:	8	Técnico de instalação:	Edsan
Data da Remoção:	27/02/2019	Período da Contagem:	7 dias completos



Relatório de Contagem e Classificação Volumétrica

Trecho: **122ERS0070**
 Regional: **Bento Gonçalves**
 Segmento: **ENTR. ERS-446 (B) (P/ SÃO VENDELINO) | ENTR. RSC-453 (A) (P/ FARROUPILHA)**
 Rodovia: **RS122**

Data Inicial: **20/02/2019**
 Data Final: **26/02/2019**
 Início: **às 00:00:00**
 Término: **às 23:59:59**

Equip. Utilizado: **PicoCount 2500**
 Número de Série: **677/671**

Coordenadas: **-29.32164,-51.34428**

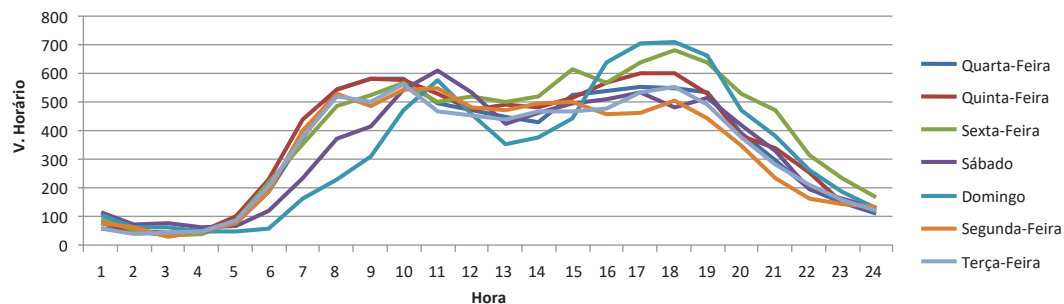
Resumo - DAER

TIPOS DE VEÍCULO	CLASSE	20/02/2019			21/02/2019			22/02/2019			23/02/2019			24/02/2019			25/02/2019			26/02/2019			MÉDIA			%
		AB	BA	Total	AB	BA	Total	AB	BA	Total	AB	BA	Total	AB	BA	Total	AB	BA	Total	AB	BA	Total	AB	BA	Total	
Passeio	01	2923	2370	5293	3066	2532	5599	3497	2804	6301	3545	2846	6392	3768	3109	6877	2996	2143	5139	2937	2244	5180	3248	2578	5826	70.8
Coletivo	02	135	99	234	149	101	250	145	97	242	59	46	105	33	30	64	127	93	221	142	80	223	113	78	191	2.3
Carga Leve	03	375	285	660	407	295	702	417	299	716	258	206	463	219	187	406	364	264	628	389	244	634	347	254	601	7.3
Carga Média	04	456	335	791	503	341	843	489	328	817	198	157	355	112	103	215	430	315	745	481	272	752	381	264	645	7.8
Carga Pesada	05	272	327	599	277	331	608	272	299	571	108	104	212	70	57	127	294	203	497	265	224	489	223	221	443	5.4
Carga Ultra Pesada	06	305	306	611	343	328	671	321	350	671	179	139	318	102	103	205	306	255	561	307	317	624	266	257	523	6.4
Totais		4466	3723	8189	4745	3928	8673	5141	4178	9319	4347	3498	7845	4305	3589	7894	4517	3273	7790	4521	3381	7902	4577	3653	8230	
Total Motos	08	26	34	09	15	24	18	15	33	14	15	29	09	08	17	14	18	32	09	23	32	12	17	29		
Total Veículos de Passeio		2923	2370	5293	3066	2532	5599	3497	2804	6301	3545	2846	6392	3768	3109	6877	2996	2143	5139	2937	2244	5180	3248	2578	5826	
Total Coletivos		135	99	234	149	101	250	145	97	242	59	46	105	33	30	64	127	93	221	142	80	223	113	78	191	
Total Veículos Carga		1408	1253	2661	1530	1295	2824	1499	1277	2775	743	605	1348	504	449	953	1393	1037	2430	1442	1057	2499	1217	996	2213	

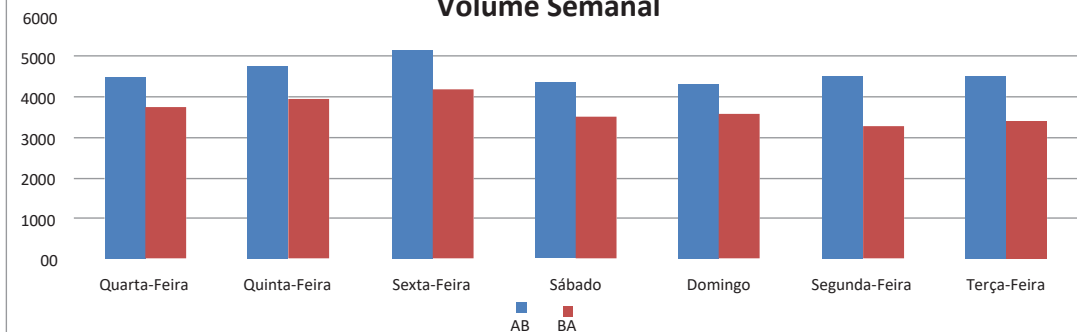
VOLUME TOTAL DIÁRIO

H. início	H. Fim	20/02	21/02	22/02	23/02	24/02	25/02	26/02
00:00	00:59	61	77	94	117	107	79	57
01:00	01:59	51	51	56	73	63	62	41
02:00	02:59	36	44	35	77	62	32	43
03:00	03:59	58	49	39	62	51	49	52
04:00	04:59	80	100	88	70	50	77	89
05:00	05:59	185	228	221	122	60	186	207
06:00	06:59	370	436	355	233	162	401	376
07:00	07:59	544	542	485	370	232	527	517
08:00	08:59	581	582	522	415	310	487	501
09:00	09:59	578	576	565	542	470	542	563
10:00	10:59	494	528	499	608	574	548	467
11:00	11:59	472	469	518	531	456	483	451
12:00	12:59	448	489	500	426	354	470	437
13:00	13:59	428	480	518	460	375	496	467
14:00	14:59	525	513	614	494	442	498	466
15:00	15:59	538	567	568	509	639	456	476
16:00	16:59	550	598	638	531	704	464	532
17:00	17:59	547	600	679	482	707	504	552
18:00	18:59	531	526	639	516	661	441	488
19:00	19:59	391	380	526	417	473	346	377
20:00	20:59	297	337	473	330	381	233	282
21:00	21:59	197	255	317	198	263	162	213
22:00	22:59	149	151	234	162	185	143	157
23:00	23:59	112	119	169	129	130	136	123



Fluxo horário/dia - 7 dias



Volume Semanal



**ANEXO B – ACIDENTES OCORRIDOS NA CURVA DO KM 46+870 NO ANO DE
2019, REGISTRADOS PELO CRBM**

Acidente/Caminhão	1	2	3
Tipo de veículo	M. BENZ L1620	VOLVO N12	M.BENZ L1620
Com ou sem carga	SEM INFORMAÇÃO	COM CARGA	COM CARGA
Tipo de carga	SEM INFORMAÇÃO	MATERIAL DE LIMPEZA	BOI VIVO
Tombou	NÃO	SIM	SIM
Saiu de pista	SIM	SIM	SIM
Faltou Freio	SIM	SIM	SIM
Vítimas	1 VÍTIMA	2 VÍTIMAS	SEM VÍTIMA
Excesso de velocidade	SEM A INFORMAÇÃO	SEM A INFORMAÇÃO	SEM A INFORMAÇÃO
Excesso de carga	SEM A INFORMAÇÃO	SEM A INFORMAÇÃO	SEM A INFORMAÇÃO
Ano do veículo	ANO 1999	ANO 1986	ANO 1997
Velocidade	NÃO CONSTATADO	NÃO CONSTATADO	NÃO CONSTATADO
Data e horário	22.01.2019 - 05:00	20.03.2019 - 20:30	23.08.2019 - 10:30
Visibilidade	ALCANCE FAROL	ALCANCE FAROL	NORMAL
Fotos dos veículos			
1			
2			
3	