

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA**

ROCHEL GOZZI

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO LIMITE DE TOMBAMENTO DE UM
SEMIRREBOQUE GRANELEIRO**

CAXIAS DO SUL

2022

ROCHEL GOZZI

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO LIMITE DE TOMBAMENTO DE UM
SEMIRREBOQUE GRANELEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador Me. Adelair Lino Colombo

CAXIAS DO SUL

2022

ROCHEL GOZZI

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO LIMITE DE TOMBAMENTO DE UM
SEMIRREBOQUE GRANELEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Me. Adelair Lino Colombo

Aprovado em __/__/____

Banca Examinadora

Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Vagner do Nascimento
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

A indústria brasileira de veículos pesados está se adequando para atender a Resolução N° 954 do Contran, que dispõe sobre a obrigatoriedade de sistemas de controle de estabilidade e antitombamento em veículos de carga a partir de 2023. O presente trabalho visa analisar os principais fatores que influenciam no escorregamento e tombamento lateral desses veículos, mais precisamente de um semirreboque. Os principais fatores que afetam a segurança do implemento rodoviário, suas características dinâmicas e comportamentos, serviram de suporte ao desenvolvimento e análise deste trabalho. Para realização do mesmo foram executados testes experimentais e coleta de dados através de manobras específicas na pista de testes, sendo por fim, realizado a comparação dos dados encontrados na metodologia, com os testes realizados pelo veículo com e sem o controle de estabilidade. Como resultados verificou-se que os valores de aceleração lateral registrada nos testes experimentais foram superiores ou iguais aos encontrados na literatura, assim como também, a realização do teste da função RSP do TEBS comprovou que a tecnologia que esse sistema dispõe, pode sim contribuir para a redução dos indicadores de acidentes de tombamento de semirreboques.

Palavras-chave: tombamento, semirreboque, controle de estabilidade.

ABSTRACT

The Brazilian heavy vehicle industry is adapting to meet the Contran Resolution No. 954, which provides for the mandatory use of stability control and anti-tumble systems in cargo vehicles as of 2023. The present work aims to analyze the main factors that influence the slipping and lateral overturning of these vehicles, more precisely of a semi-trailer. The main factors that affect road implement safety, its dynamic characteristics and behaviors, supported the development and analysis of this work. To carry out the same, experimental tests and data collection were performed through specific maneuvers on the test track, and finally, a comparison of the data found in the methodology was carried out, with the tests carried out by the vehicle with and without stability control. As a result, it was found that the values of lateral acceleration recorded in the experimental tests were greater than or equal to those found in the literature, as well as the performance of the TEBS of RSP function test proved that the technology that this system has, it can indeed contribute to the reduction of semi-trailer overturning accident indicators.

Keywords: rollover, semi-trailer, stability control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito Slosh em caminhão tanque durante uma ultrapassagem	17
Figura 2 - Amplificação traseira em diferentes combinações	17
Figura 3 - Modos de instabilidade lateral de veículos articulados	18
Figura 4 - Modelo de equilíbrio das forças em curva superelevada.	19
Figura 5 - Diagrama de um veículo rígido em pista plana e movimento curvilíneo.	24
Figura 6 - Diagrama de um veículo rígido em pista inclinada e movimento curvilíneo.	25
Figura 7 - Diagrama do veículo com suspensão em pista plana e movimento curvilíneo.	27
Figura 8 - Faixas de variação do limite de tombamento lateral estático de vários veículos. ...	28
Figura 9 - Teste de inclinação de mesa.....	30
Figura 10 - Teste dinâmico em pista de teste	31
Figura 11 - Válvulas moduladoras TEBS.....	32
Figura 12 - Fluxograma	33
Figura 13 - Instrumentação no veículo	34
Figura 14 - Veículo utilizado no teste	36
Figura 15 - Manobras	37
Figura 16 - Sistema EBS x ABS.....	39
Figura 17 - Sensor para veículos com suspensão mecânica	40
Figura 18 - Diagrama de blocos funcionamento do TEBS.....	41
Figura 19 - Consequência da variação do filtro.....	43
Figura 20 - Manobra circle test sentido horário - Sem TEBS	44
Figura 21 - Manobra circle test sentido horário - Com TEBS.....	45
Figura 22 - Manobra circle test sentido anti-horário - Sem TEBS.....	45
Figura 23 - Análise da manobra circle test sentido anti-horário.....	46
Figura 24 - Manobra circle test sentido anti-horário - Com TEBS	47
Figura 25 - Manobra J-turn - Sem TEBS	48
Figura 26 - Manobra J-turn - Com TEBS.....	48
Figura 27 - Manobra single lane change - Sem TEBS	49
Figura 28 - Manobra single lane change - Teste de pulso	50
Figura 29 - Manobra single lane change - Com TEBS.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atrito lateral máximo disponível para veículos pesados.....	22
Tabela 2 - Classificação dos veículos conforme norma brasileira	29
Tabela 3 - Materiais utilizados	34
Tabela 4 - Tabela padrão das massas.....	35
Tabela 5 - Informações gerais sobre o veículo do teste.....	36
Tabela 6 - Resultados conforme variação do filtro.....	43
Tabela 7 - Resultados da manobra circle test sentido horário - Sem TEBS.....	44
Tabela 8 - Resultados da manobra circle test sentido horário - Com TEBS	45
Tabela 9 - Resultados da manobra circle test sentido anti-horário - Sem TEBS.....	46
Tabela 10 - Resultados da manobra circle test sentido anti-horário - Com TEBS.....	47
Tabela 11 - Resultados da manobra J-turn - Sem TEBS	48
Tabela 12 - Resultados da manobra J-turn - Com TEBS	49
Tabela 13 - Resultados da manobra single lane change - Sem TEBS.....	49
Tabela 14 - Resultados da manobra single lane change - Teste de pulso.....	50
Tabela 15 - Resultados da manobra single lane change - Com TEBS	51
Tabela 16 - Resultados do teste experimental	52
Tabela 17 - Valores encontrados na bibliografia para STR.....	52
Tabela 18 - Fator de atrito encontrado na bibliografia	53
Tabela 19 - Resultados	54

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Peso do veículo (N)
R	Raio de curvatura (m)
v	Velocidade do veículo [km/h ou m/s]
m	Massa do veículo (kg)
f	Coefficiente de atrito Transversal
a_y	Aceleração lateral (g)
h	Altura do centro de gravidade - CG (m)
F_c	Força centrípeta (N)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
t	Bitola do veículo (m)
θ	Ângulo de inclinação da pista (graus)
$e = tg \theta$	Superelevação (m/m)
F_{at}	Força de atrito transversal (N)
R_{min}	Raio mínimo da curva [m]
e_{max}	Superelevação máxima (m/m)
f_{max}	Coefficiente de atrito Transversal máximo
$f_{y,max,sl}$	Fator de atrito lateral estático máximo disponível [adim.]
$f_{x,max,sk}$	Fator de atrito longitudinal dinâmico máximo disponível [adim.]
f_{dem}	Fator de atrito lateral demandado [adim.]
b_v	Fator de ajustamento do tipo de veículo “atrito” (1,1 para veículos pesados) [adim.]
b_s	Fator de sobresterçamento ($\approx 1,15$) [m/m]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CTR	Centro tecnológico Randon
VDA	<i>Vehicle Dynamics Area</i>
ABS	<i>Antilock Braking System</i>
CNT	Confederação Nacional dos transportes
CG	Centro de Gravidade
PIB	Produto Interno Bruto
SRT	Limite de Tombamento Lateral
VSF	Função de Estabilidade do Veículo
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	Objetivo geral	14
1.3.2	Objetivos específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	FATORES INFLUENCIADORES	15
2.1.1	Motorista	15
2.1.2	Rodovia	15
2.1.3	Veículo	16
2.2	CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE LATERAL	19
2.2.1	O Fenômeno do tombamento e escorregamento	19
2.2.2	Forças atuantes no veículo	19
2.2.3	Atrito transversal	21
2.2.4	Limite de tombamento lateral estático – veículo bidimensional rígido	24
2.2.5	Limite de tombamento lateral estático – veículo bidimensional flexível	26
2.3	LEGISLAÇÃO	28
2.4	TESTES REAIS DE LIMITE DE TOMBAMENTO	30
3	Proposta de trabalho	32
3.1	OBJETO DE ESTUDO	32
3.2	FASES DE DESENVOLVIMENTO	33
3.2.1	Selecionar equipamentos, caminhão e semirreboque	33
3.2.2	Instrumentar o veículo	34
3.2.3	Carregar o veículo e instalar o outrigger	35
3.2.4	Demarcar as manobras na pista	36
3.2.5	Realizar e filmar as manobras	37
3.2.6	Analisar os dados coletados	37
3.2.7	Instalar a válvula moduladora	37
3.2.8	Realizar e filmar as manobras	38

3.2.9	Realizar os cálculos teóricos	38
3.2.10	Comparar os cálculos teóricos com os dados coletados	38
4	RESULTADOS E DISCUÇÕES	39
4.1	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA tebs	39
4.2	RESULTADO DOS TESTES EXPERIMENTAIS	43
4.2.1	Steady state circular test	43
4.2.2	J-turn.....	47
4.2.3	Single lane change	49
4.3	COMPARAÇÃO DOS DADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS	51
5	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O ramo de transporte rodoviário de cargas é um dos setores mais importantes para a economia do Brasil, dados do Relatório da frota circulante apontam que em 2020 o número total de caminhões circulando no país já havia ultrapassado a marca de 2 milhões de unidades (RELATÓRIO...,2021).

Se por um lado o transporte de cargas representa somente 1,4 ponto percentual do PIB, considerando análise realizada entre 2010 a 2017 da Fundação Getúlio Vargas, por outro, este mesmo setor pode representar um impacto negativo de até 29% na economia em caso de uma paralisação, pelo fato de promover a interligação de praticamente todas as atividades econômicas presentes no país (RELAÇÃO...,2020).

No entanto, dados da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) apontam que no período de 2007 a 2018 foram registrados 1.721.609 acidentes somente em rodovias federais, deste total 756.732 com vítimas (mortos ou feridos), dos quais 24,8% com envolvimento de pelo menos um caminhão, sendo o capotamento e tombamento a segunda maior causa de acidentes desse modal (ACIDENTES...).

Outra pesquisa da CNT aponta que somente em 2021 foram 64.452 acidentes nas rodovias federais, sendo 52.762 com vítimas, representando em termos monetários um custo anual de mais de 12,19 bilhões de reais (PAINEL...).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2018 o número de mortes em acidentes de trânsito ultrapassou a marca de 1,35 milhão, sendo a principal causa de morte entre crianças e jovens com idade entre 5 e 29 anos. Em razão disso a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou 12 metas a serem atingidas pelos países até 2030. O Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV) analisou as 12 metas da ONU e as adequou à realidade do Brasil, com o intuito de formalizar ações que vise a redução do elevado número de fatalidades nas rodovias do país.

Entre as metas elaboradas destacam-se: todas as novas vias devem atender a padrões técnicos que levam em conta a segurança viária, satisfazendo uma classificação mínima de três estrelas, seguindo o programa iRAP (*International Road Assessment Programme*); até 2030 100% dos veículos novos (produzidos, vendidos ou importados) devem atingir altos níveis de qualidade de segurança; para os motoristas profissionais deve haver regulamentação e fiscalização das leis de descanso e tempo de direção. Com isso, espera-se que neste período haja a redução do número de acidentes e vítimas envolvendo o excesso de velocidade, uso de álcool, uso de celular, o não uso de cinto de segurança ou capacete (12 METAS...,2019).

Vendo a importância econômica que representa o caminhão para toda a população, em contrapartida analisando o número de acidentes, o alto custo envolvido nesses fatos, os riscos envolvidos nessa profissão, juntamente com as metas cada vez mais rigorosas visando uma maior segurança no trânsito, cabe aqui um estudo dos fatores que influenciam em grande parte essas ocorrências, mais pontualmente acidentes por tombamento de veículos pesados, em seguida compete uma breve descrição das novas tecnologias e normas presentes que auxiliaram na diminuição destes indicadores.

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

O presente trabalho foi realizado com o auxílio do setor de engenharia de testes do Centro Tecnológico da Randon (CTR) que fica localizado no município de Farroupilha -RS. Essa empresa foi criada em 2010 com o intuito de ser um Campo de provas ou em outras palavras um centro de testes para todo o Grupo Randon e também outros fabricantes. O CTR conta com uma ampla estrutura que engloba uma área de 92 hectares, mais de 15 quilômetros de pistas, distribuídos em 20 diferentes tipos, com destaque a recém lançada pista de VDA (Vehicle Dynamics Area) e ABS (Antilock Braking System). Também dispõem de um prédio de 2200 m² que abriga a garagem para instrumentação e preparação de veículos, laboratórios, oficina e análise virtual.

O Campo de Provas oferece confiabilidade, segurança e padronização na realização dos testes, atendendo exigências das legislações brasileira e internacionais.

1.2 JUSTIFICATIVA

As novas tecnologias estão cada vez mais presentes em nosso dia-a-dia, sendo nossa aliada quando o assunto é a redução dos indicadores de acidentes. Aliado a isso, um novo marco na segurança de veículos de cargas, transportes de passageiros e semirreboques estará vigente, nele novos itens de segurança passarão a ser obrigatórios nos veículos conforme a resolução N° 954 do Conselho Nacional de trânsito (CONTRAN) de 28 de Março de 2022, que estabelece como obrigatória a instalação do Sistema de Controle de Estabilidade nos veículos novos, nacionais e importados, das categorias presentes na Tabela 2. Tendo em vista que para isso novos testes serão realizados torna-se justificado o estudo para um melhor aperfeiçoamento do assunto, principalmente sobre o limite de tombamento em semirreboques, bem como a análise

detalhada do modelo atual para que posteriormente possa ser feita a comparação e a verificação do correto funcionamento do novo modelo requerido.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é realizar uma análise do comportamento estático e dinâmico do tombamento e escorregamento de um semirreboque com e sem o controle de estabilidade.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar resoluções do CONTRAN;
- Analisar o comportamento do semirreboque durante as manobras dinâmicas;
- Medir experimentalmente os dados de aceleração lateral e velocidade do veículo sem a válvula moduladora, encontrando seu limite para cada manobra;
- Repetir a etapa acima após a instalação da válvula moduladora;
- Calcular o limite de tombamento lateral seguindo a bibliografia;
- Explorar a metodologia desenvolvida, comparando os dados teóricos com os testes experimentais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a completa compreensão deste trabalho, alguns conceitos devem ser apresentados nesse capítulo. Nesta sequência, a seção 2.1 mostrará os principais fatores responsáveis pelos acidentes, já a seção 2.2 ilustrará os critérios utilizados para a análise da estabilidade dos veículos, enquanto na seção 2.3 tratará da legislação vigente em nosso país, e por fim há o detalhamento dos principais testes realizados para a obtenção do limite de tombamento lateral na seção 2.4.

2.1 FATORES INFLUENCIADORES

A respeito dos fatores responsáveis pelos acidentes rodoviários, Treat et al. (1979 apud Viapiana, 2020) resume-os em três grandes grupos: motorista, veículo e rodovia, discriminados a seguir.

2.1.1 Motorista

Meyer (2019) aponta os principais fatores relacionados ao condutor quando o assunto é a imprudência na via, são eles: muitas horas seguidas dirigindo desrespeitando a lei dos caminhoneiros gerando assim cansaço e redução dos reflexos; excesso de velocidade; ultrapassagens perigosas e em locais proibidos; mudança repentina de faixa aliada a pouca distância entre veículos; uso de bebidas alcoólicas ou entorpecentes; uso do celular resultando em não observação da via; e a falta de revisão do veículo que leva a condições inadequadas de trafegabilidade.

De outra forma pode se dizer que a imprudência do motorista ao definir a trajetória, juntamente com a velocidade inadequada para o movimento, resulta em uma aceleração centrípeta que irá atuar sobre o veículo podendo ou não causar o tombamento. (EJZENBERG,2009).

2.1.2 Rodovia

Dos grupos citados no item 2.1 a rodovia é o fator que menos depende do condutor. Ela deve-se encontrar da maneira mais segura possível, estando em bom estado de conservação, bem sinalizada e principalmente bem projetada para que a parcela do risco de acidentes associado a essa causa seja a menor possível. (TREAT et al.,1979 apud VIAPIANA ,2020).

Segundo Ejzenberg (2009) existem três principais agentes relacionados a via que induzem o aumento no risco de tombamento em veículos pesados. São eles: raio de curva pequeno; declive, o qual induz o aumento da velocidade durante declives longos provocando a perda de eficiência dos freios por aquecimento, conhecido como *fade*; e a superelevação, que é o declínio transversal da pista com caimento orientado para o lado interno da curva a fim de compensar a força centrífuga, sendo maior quanto menor for o raio da pista, na qual serve como auxílio na realização das curvas, porém por outro lado, permite que as mesmas sejam percorridas com maior velocidade.

2.1.3 Veículo

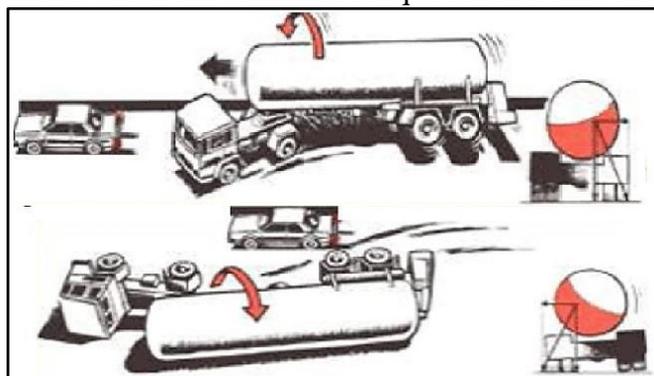
Além dos fatores mais conhecidos como excesso, o tipo e a distribuição incorreta da carga, existem outras razões menos significativas, porém quando somadas causam grande efeito sobre a estabilidade do veículo, são elas: a bitola dos eixos; altura do centro de gravidade; folga e flexibilidade lateral da suspensão e na quinta roda; número de articulações; qualidade e pressão dos pneus e pôr fim a qualidade estrutural do veículo (WINKLER,2000).

2.1.3.1 Excentricidade e tipos de carga

Winkler (2000) avalia o efeito da excentricidade da carga relacionando o deslocamento lateral com o valor da meia bitola ($t/2$) do veículo, desse modo deduz que cada centímetro de deslocamento da carga do ponto central para a lateral do semirreboque, reduz o Limite de Tombamento Lateral Estático – SRT em aproximadamente 1%.

Outra adversidade enfrentada, se dá a respeito de cargas líquidas transportadas por caminhões tanques. Durante o movimento de ultrapassagem ou em curvas onde há alteração brusca na trajetória do veículo, o líquido se move de um lado para outro produzindo uma alteração no CG do conjunto, reduzindo ainda mais o limite de tombamento lateral. Esse efeito é conhecido como efeito *slosh* demonstrado na figura 3 (WINKLER,2000).

Figura 1 - Efeito Slosh em caminhão tanque durante uma ultrapassagem



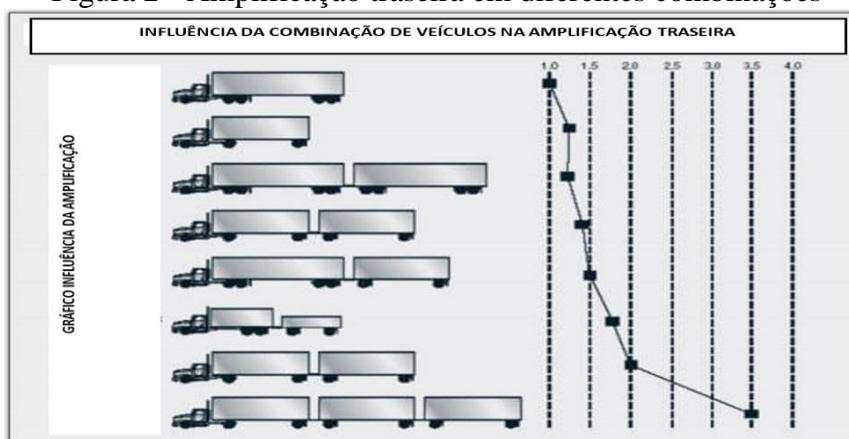
Fonte: Meyer (2019)

2.1.3.2 Amplificação traseira

O número de articulações do veículo está diretamente ligado ao fenômeno chamado de amplificação Traseira (*Rearward Amplification*), o qual é a razão entre a aceleração lateral gerada na última unidade da combinação e a aceleração lateral do caminhão durante as manobras, sendo uma característica específica de veículos de cargas na qual afeta significativamente a dirigibilidade e conseqüentemente a segurança desses veículos na rodovia (MELO,2018)

Meyer (2019) afirma que esse fenômeno está presente em pequena intensidade em caminhões com configuração convencional como o analisado neste trabalho, ou seja, o primeiro veículo ilustrado na figura abaixo, contudo vale ressaltar a influência que esse evento pode causar em veículos com mais de uma articulação, sendo ilustrado com mais clareza na figura a seguir.

Figura 2 - Amplificação traseira em diferentes combinações



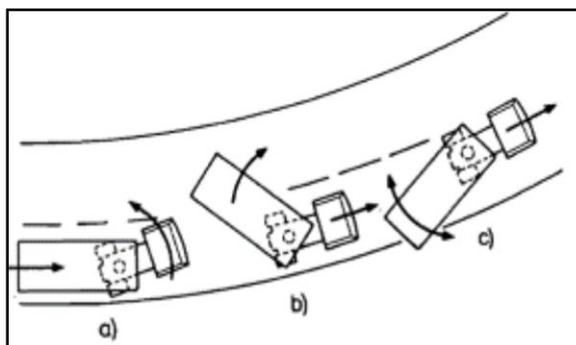
Fonte: Meyer (2019)

2.1.3.3 Efeito chicote e canivete

Apesar do país estar buscando meios para reduzir o principal tipo de acidente envolvendo semirreboques (o tombamento), existe outro tipo de acidente que infelizmente também é muito frequente em nossas estradas o qual é causado pela perda de aderência dos pneus. No efeito chicote (*Trailer Swing*) a perda de aderência é apenas do semirreboque causando um escorregamento lateral, já no efeito canivete (*Jackknife*) ocorre em uma condição onde o semirreboque “empurra” o cavalo mecânico levando-o a escorregar lateralmente e girar. Ambos fenômenos são popularmente conhecidos como “L” ou “fechar o “L” (BATISTA,2021)

Segundo Batista (2021) esse tipo de acidente é causado pelo baixo coeficiente de atrito entre os pneus e a pista, podendo na maioria dos casos não apresentar altas acelerações laterais, com isso, mesmo com a obrigatoriedade do controle de estabilidade em veículos articulados exigida no Brasil pela regulamentação 954:2022 do Contran, pode se deduzir que a leitura dessa manobra não é perceptível pelo novo controle, repercutindo em uma baixa redução da incidência desse tipo de acidente.

Figura 3 - Modos de instabilidade lateral de veículos articulados



Fonte: VLK, F. (1982 apud Batista,2021)

Sendo descrito a,b,c como:

- a) Acotovelamento: Efeito Canivete ou “L” do cavalo mecânico (*Jackknife*).
- b) Guinada do Semirreboque: Efeito Chicote ou “L” do semirreboque (*Trailer Swing*)
- c) Oscilação bilateral do semirreboque - Efeito Chicote.

2.2 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE LATERAL

2.2.1 O Fenômeno do tombamento e escorregamento

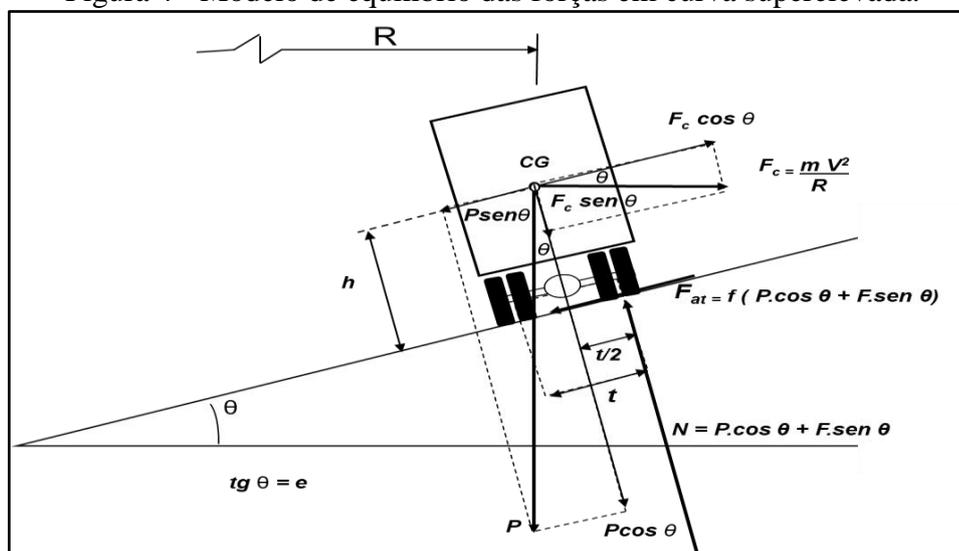
Segundo Bonneson (2000), um veículo ao realizar uma curva pode sofrer duas falhas: escorregamento ou tombamento lateral. As falhas ocorrem quando a aceleração lateral supera o limite da força de atrito, ou quando a aceleração lateral gerada na manobra, produz um momento de rotação que gira o veículo em torno dos pneus externos. Para os automóveis que na grande maioria apresentam centro de gravidade baixo a falha por escorregamento ocorre antes do tombamento, porém para veículos de cargas ocorre o contrário, principalmente quando estão totalmente carregados.

Conforme Meyer (2019), o tombamento é caracterizado pelo giro de 90° sobre o eixo longitudinal do veículo, ou seja, fica apoiado sobre uma de suas laterais, enquanto no capotamento esse giro é de 180° ou mais, podendo o veículo parar em qualquer posição, sendo um acidente mais grave. Tratando-se de veículo de carga, por apresentar peso e dimensões elevadas, o tombamento também chamando de tombamento lateral é o tipo mais comum.

2.2.2 Forças atuantes no veículo

A figura 4 representa o equilíbrio das forças de um veículo com velocidade de deslocamento (v) constante, percorrendo uma curva horizontal de raio (R), com superelevação (e), sendo melhor detalhado a seguir:

Figura 4 - Modelo de equilíbrio das forças em curva superelevada.



Fonte: Adaptado de Ejzenberg (2009)

Tendo conhecimento das leis básicas da mecânica onde a aceleração lateral (a_y) é representada pela equação (1), na qual (v) é a velocidade de deslocamento do veículo e (R) o raio da curva, assim como também a força centrípeta (F_c) é encontrada e representada pela multiplicação da aceleração lateral pela massa do veículo (m), tem-se a equação (2), ambas descritas a seguir:

$$a_y = \frac{v^2}{R} \quad (1)$$

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

Sendo:

P = Peso do veículo (N)

R = Raio de curvatura (m)

m = Massa do veículo (kg)

v = Velocidade de deslocamento do veículo (m/s)

f = Coeficiente de atrito Transversal (N)

a_y = Aceleração lateral (m/s²)

h = Altura do centro de gravidade - CG (m)

F_c = Força centrípeta (N)

g = Aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

t = Bitola do veículo (m)

θ = Ângulo de inclinação da pista (graus)

$e = tg \theta$ = Superelevação (m/m)

F_{at} = Força de atrito transversal (N)

O sentido da força centrípeta é desenhado conforme o sentido ditado pelo princípio de D'Alembert, como força centrífuga inercial de sentido oposto. (EJZENBERG, 2009).

Para a condição limite de equilíbrio estático, o equilíbrio de forças atuantes é representado dessa maneira:

$$P \cdot \sin \theta + f \cdot (P \cdot \cos \theta + F_c \cdot \sin \theta) = F_c \cdot \cos \theta$$

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

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

Dividindo toda a equação por (m), considerando ($\tan \theta = e$) e deixando em evidência o termo (v^2/gR) tem-se a equação básica para veículos em curva. Em função do termo ($f \cdot e$) ser de segunda ordem, e por isso sempre muito pequeno, normalmente é desprezado:

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

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

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

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

Na condição de limite de escorregamento, com fator de atrito máximo ($f = f_{max}$) e superelevação máxima ($e = e_{max}$), tem-se o raio mínimo da curva horizontal, para (v) em (km/h) e (g) = $9,8 m/s^2$, sendo representado pela equação (3), (EJZENBERG, 2009).

$$R_{min} = \frac{v^2}{127 \cdot (e_{max} + f_{max})} \quad (3)$$

Em que:

v = Velocidade do veículo (Km/h)

R_{min} = Raio mínimo da curva (m)

e_{max} = Superelevação máxima (m/m)

f_{max} = Coeficiente de atrito Transversal máximo (adim.)

2.2.3 Atrito transversal

Primeiramente é preciso esclarecer duas terminologias bastante comuns, a primeira se trata do termo “escorregamento”, no qual o veículo desliza lateralmente para fora da pista, associado ao atrito estático. Já a segunda, a “derrapagem”, pode aparecer com o significado de deslizamento longitudinal em uma situação de roda travada, agindo como atrito dinâmico, variando um pouco do encontrado no dia-a-dia, no qual pode ser encontrado quando um veículo desliza de modo incontrolável sem direção (BONNESON,2000).

Para estimar o atrito lateral disponível para veículos pesados, (Ibid) relacionou o fator de atrito lateral estático máximo disponível com o fator de atrito longitudinal dinâmico máximo disponível, sendo:

$$f_{y, max,sl} = 1,01 \cdot f_{x, max,sk} \quad (4)$$

Onde:

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

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

Bonneson (2000) elaborou a Tabela 1, na qual ilustra os valores médios dos fatores de atrito lateral máximos para falha por escorregamento lateral de veículos pesados.

Tabela 1 - Atrito lateral máximo disponível para veículos pesados

Velocidade de projeto (km/h)	Máximo fator de atrito Longitudinal Disponível ($f_{x,max,sk}$)	Máximo fator de atrito Lateral Disponível ($f_{y,max,sl}$)
30	0,53	0,54
40	0,48	0,49
50	0,44	0,45
60	0,4	0,37
70	0,36	0,35
80	0,34	0,33
90	0,33	0,32
100	0,31	0,31
110	0,3	0,3
120	0,29	0,29

Fonte: Adaptado de Bonneson (2000)

Segundo o DNIT (2010), ao percorrer uma curva o veículo está sujeito à ação da força centrífuga, que é contrabalançada pelo atrito entre os pneus e a superfície da rodovia. Os valores do coeficiente de atrito transversal máximos disponível pelo pavimento varia com a velocidade do veículo entre 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.

Para a determinação do atrito demandado por veículos pesados o autor observa que a equação (5) é fundamentada na equação (3), sendo baseado 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 (BONNESON,2000).

$$f = \frac{v^2}{g \cdot R} - e \quad (5)$$

Onde:

v = velocidade em (m/s)

Porém o atrito demandado por veículos pesados segundo (Ibid) excede em aproximadamente 10% o informado na equação (5), devido a distribuição não uniforme em consequência da quantidade de pneus em seu rodado. Também conclui que o veículo pode sofrer influencias por causa do sobresterçamento (diferença entre o raio crítico da manobra em curva e o valor do raio geométrico da curva), podendo ser de 1,1 a 1,5 vezes maior que o raio de trajetória, com isso o atrito lateral demandado é 15% maior que o previsto pela Equação (5). Esse aumento em 15 % segundo Ejzenberg (2009), também está relacionado as dimensões dos veículos de cargas, nos quais têm a necessidade de que sua trajetória seja atrasada na entrada de curvas a fim de impedir que os pneus dos últimos eixos traseiros internos à curvatura saiam ou invadam a outra pista.

Sabendo disso foi elaborado a equação (6), na qual descreve o fator de atrito lateral máximo demandado por veículos pesado em curvas:

$$f_{dem} = b_v \cdot b_s \cdot \frac{v^2}{g \cdot R} - e \quad (6)$$

Em que:

f_{dem} = fator de atrito lateral demandado (adim.)

b_v = fator de ajustamento do tipo de veículo “atrito” (1,1 para veículos pesados) (adim.)

b_s = fator de sobresterçamento ($\approx 1,15$) (m/m)

Substituindo (g) = $9,8 \text{ m/s}^2$, (b_v) = 1,1 e (b_s) = 1,15, (v) em (km/h), tem-se a Equação 7:

$$f_{dem} = 1,1 \left(1,15 \frac{v^2}{127 \cdot R} \right) - e \quad (7)$$

Em que:

f_{dem} = fator de atrito lateral demandado (adim.)

v = velocidade do veículo (km/h)

R = raio da curva (m)

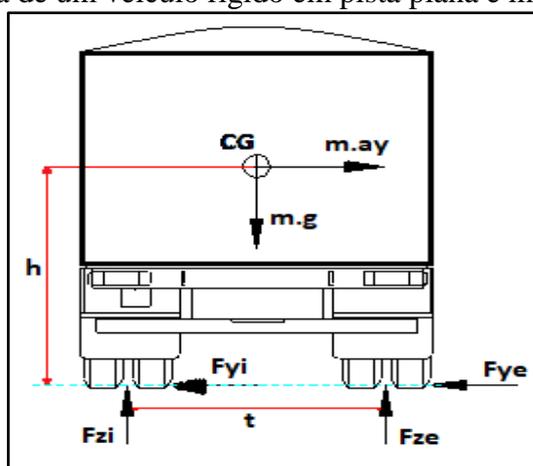
e = superelevação na curva (m/m)

2.2.4 Limite de tombamento lateral estático - veículo bidimensional rígido

O fenômeno do tombamento em curvas ocorre pois durante a manobra é gerado uma aceleração lateral (ay) que age sobre o centro de gravidade (CG), sendo essa perpendicular ao vetor velocidade na qual o veículo se desloca. A aceleração lateral corresponde a velocidade longitudinal ao quadrado, dividido pelo raio da curva realizada pelo veículo, como visto na equação (1), onde a máxima aceleração lateral na qual o tombamento começa, recebe o nome de Limite de Tombamento Lateral Estático - *Static Rollover Threshold* (SRT), expresso em unidades da aceleração da gravidade (g). À medida que a aceleração lateral aumenta, a carga nas rodas internas diminui. A condição limite da curva, ou o SRT máximo, ocorrerá quando a carga nas rodas internas atingir zero, ou em outras palavras, quando toda a carga tiver sido transferida para as rodas externas, a partir desse ponto o tombamento se inicia, uma vez que o veículo não consegue mais manter o equilíbrio no plano de rolagem (GILLESPIE, 1992).

Segundo Gillespie (1992), o método mais simples de ser compreendido envolvendo capotamento de um veículo é o modelo estático, nesse caso assume-se um veículo bidimensional e unitário (não articulado), rígido (pneus, suspensão e estrutura indeformáveis) onde o veículo gira entorno do seu eixo longitudinal. Também atribui que a manobra é executada em uma curva horizontal plana (sem declividade longitudinal) com velocidade constante e que as forças do lado interno da curva (F_{zi} e F_{yi}) e do lado externo (F_{ze} e F_{ye}) são as combinações do resultado das forças sobre os diversos pneus do veículo.

Figura 5 - Diagrama de um veículo rígido em pista plana e movimento curvilíneo.



Fonte: Adaptado de Gillespie (1992)

Conforme 2º lei de Newton e assumindo que o veículo está em uma pista plana, o somatório das forças é representado por:

$$F_{zi} \cdot t + m \cdot a_y \cdot h - \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot t = 0 \quad (8)$$

Segundo Melo (2018), a equação acima pode ser simplificada, deixando assim a aceleração lateral em unidades de g:

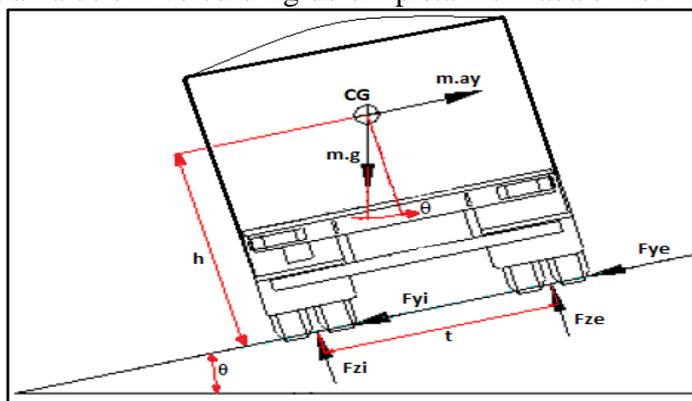
$$\frac{a_y}{g} = \frac{t}{2 \cdot h} - \frac{F_{zi} \cdot t}{m \cdot g \cdot h} \quad (9)$$

Tendo conhecimento que no instante que o veículo começa a tombar a força normal do lado interno da curva (F_{zi}) é igual a zero, sabendo disso, o terceiro termo da equação acima pode ser desconsiderado.

$$\frac{a_y}{g} = \frac{t}{2 \cdot h} \quad (10)$$

Para o caso de uma pista inclinada, ou seja, com superelevação, o diagrama de corpo livre do veículo de carga é ilustrado na imagem a seguir:

Figura 6 - Diagrama de um veículo rígido em pista inclinada e movimento curvilíneo.



Fonte: Adaptado de Melo (2018)

O somatório das forças é representado por (ibid), da seguinte forma:

$$F_{zi} \cdot t + m \cdot a_y \cdot h - m \cdot g \cdot h \cdot \text{sen} \theta - \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot t \cdot \text{cos} \theta = 0 \quad (11)$$

Simplificando a equação acima, semelhante ao processo feito anteriormente com o veículo em pista plana, e também, assumindo que para pequenos ângulos $\text{sen} \theta \approx \theta$ e $\text{cos} \theta \approx 1$, tem-se:

$$\frac{a_y}{g} = \frac{t}{2 \cdot h} + \theta - \frac{F_{zi} \cdot t}{m \cdot g \cdot h} \quad (12)$$

Também neste caso, a força normal do lado interno da curva (F_{zi}) é igual a zero no momento em que o veículo começa a tombar, podendo assim, da mesma forma ser desconsiderado. É possível notar a semelhança entre a equação da pista inclinada com a da pista plana, sendo aceitável usar somente a equação abaixo desconsiderando θ quando se tratar de pistas planas (MELO, 2018).

$$SRT_{geom.} = \frac{a_y}{g} = \frac{t}{2 \cdot h} + \theta \quad (13)$$

A equação acima é conhecida como Limite de tombamento lateral geométrico - $SRT_{geom.}$. Outra maneira de encontrar o limite de tombamento lateral de um veículo é baseando-se na equação (1), essa por sua vez recebe o nome de Limite de tombamento lateral estático - SRT_e , sendo ambas expressas em aceleração da gravidade (g).

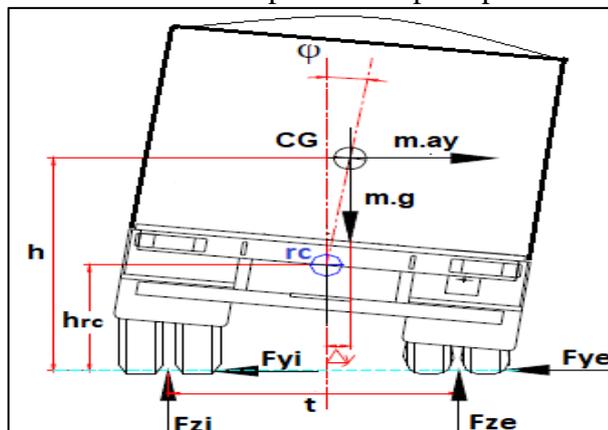
$$SRT_e = \frac{v^2}{g \cdot R} \quad (14)$$

No entanto, as estimativas são muito irrealistas expondo um limite maior que o real, sendo úteis apenas para comparação entre veículos (GILLESPIE, 1992). Os efeitos da suspensão e dos pneus são desprezados neste modelo, com isso o limite para ocorrer o tombamento, pode ocorrer com uma aceleração lateral maior do que a real (MELO, 2018).

2.2.5 Limite de tombamento lateral estático - veículo bidimensional flexível

Durante uma trajetória curva, por exemplo, a carga do lado interno do veículo acaba sendo transferida para o lado externo da curva, fazendo com que o Centro de Gravidade do veículo mova-se também para o lado externo, como pode ser visto na imagem a seguir, nela é representada a carga do veículo inclinada, fazendo assim com que o centro de gravidade se aproxime do ponto de giro (e), desta forma reduzindo o braço da alavanca na medida de Δy causando uma diminuição no momento proporcionado pela massa suspensa (Ibid)

Figura 7 - Diagrama do veículo com suspensão em pista plana e movimento curvilíneo.



Fonte: Adaptado de Gillespie (1992)

Neste caso também é possível notar o aparecimento de um ponto imaginário chamado de “Centro de Giro” (roll center), representado pela sigla “rc”, sendo este o ponto onde as forças laterais são transferidas do eixo para a massa suspensa (GILLESPIE, 1992).

Resultando em:

$$F_{zi} \cdot t + m \cdot a_y \cdot h - m \cdot g \cdot \left[\frac{t}{2} - (h - h_{rc}) \cdot \tan\psi \right] = 0 \quad (15)$$

Desprezando (F_{zi}), considerando $\tan\psi \approx \psi$ para pequenos ângulos e rearranjando a equação temos:

$$\frac{a_y}{g} = \frac{t}{2 \cdot h} \cdot \left[1 - \frac{t}{2} \cdot (h - h_{rc}) \cdot \tan\psi \right] \quad (16)$$

Nota-se a semelhança com as equações do modelo sem suspensão, porém neste caso a aceleração necessária para provocar o tombamento de um veículo, é reduzida pelo novo fator.

Para uma análise mais precisa do Limite de Tombamento Lateral estático é fundamental uma análise mais detalhada dos sistemas de suspensão e pneus. Uma descrição mais apurada desses fatores irá afetar a magnitude da aceleração lateral capaz de provocar o tombamento, tornando seu valor mais preciso (GILLESPIE, 1992).

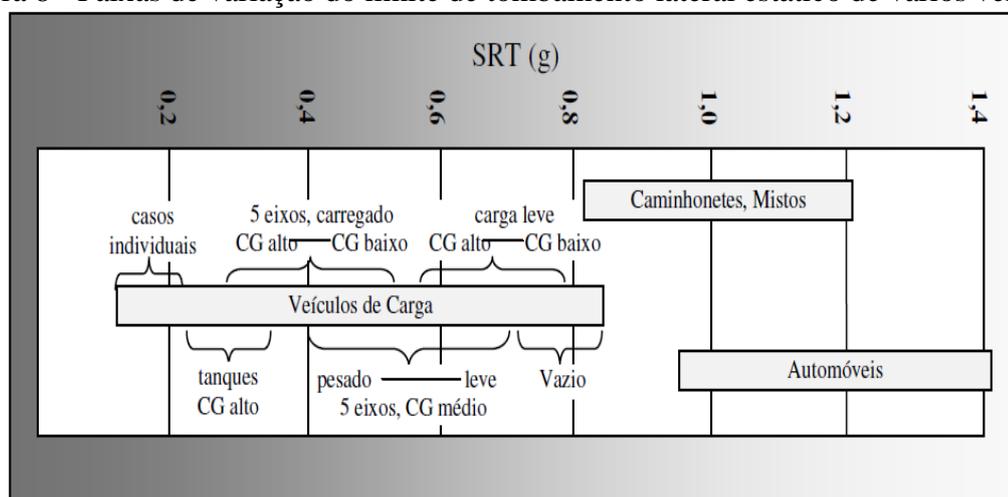
Portanto, é possível afirmar que quanto maior o valor do SRT, maior estabilidade e menor tendência ao tombamento o veículo possui. (GILLESPIE, 1992).

Muller et al.(1999), em um estudo sobre acidentes com a frota de caminhões da Austrália, revelou que veículos de carga com SRT abaixo de 0,3 g têm risco de se envolver em acidentes do tipo tombamento três vezes maior que os demais. Ele também classifica os veículos de carga de acordo com seu SRT, sendo:

- Bom – com SRT acima de 0,35 g.
- Marginal – com SRT entre 0,30 e 0,35 g.
- Pobre – com SRT abaixo de 0,30 g.

Ejzenberg (2009), em sua pesquisa sobre o limite afirma que o recomendado para veículos articulados é apresentar SRT entre 0,30 g e 0,38 g, sendo o mais comum 0,35 g. Já Gillespie (1992) aponta que caminhões pesados no qual possuem altura do CG entre 1,52 e 2,16 metros e bitola entre 1,78 e 1,83 metros apresentam SRT por volta de 0,4 a 0,6 g.

Figura 8 - Faixas de variação do limite de tombamento lateral estático de vários veículos.



Fonte: Ejzenberg (2009)

2.3 LEGISLAÇÃO

A Resolução do CONTRAN N° 641 de 14 de dezembro de 2016, declara que levando em consideração o Plano da Década de Ações para Segurança Viária e a participação do Brasil no Fórum Mundial para Harmonização dos Regulamentos Veiculares (WP.29) ambos da ONU, apresenta-se a necessidade de atualizar e aperfeiçoar os requisitos de segurança para os condutores e os veículos automotores do país. Levando em conta que o sistema de controle de estabilidade proporciona uma melhor dirigibilidade e uma maior segurança aos ocupantes do veículo, coube a partir dessas considerações a fundação dessa norma.

Vale aqui ressaltar que a norma citada acima, foi substituída em 28 de março de 2022 pela resolução N° 954 do CONTRAN. A nova resolução afirma que os resultados de ensaios devem cumprir com os Regulamentos das Nações Unidas ECE R13-H, ECE R13 ou ECE R140, ou com a normativa Norte-Americana FMVSS 126. Como este trabalho aborda semirreboques (categoria O4 com 3 eixos) fica especificado que a partir de 1° de janeiro de 2023, projetos que

tenham recebido o código de marca/modelo/versão a partir de 14 de dezembro de 2016 devem ser equipados com a Função de Estabilidade do Veículo (VSF) e possuir no mínimo a função de controle de rolagem, explicitado conforme trecho a seguir:

II - Função de Estabilidade do Veículo (VSF): sistema que possui uma ou ambas das seguintes funções:

a) controle direcional: designa uma função no âmbito do controle de estabilidade do veículo, a qual auxilia o motorista dentro dos limites físicos do veículo, em situações de sobre esterço e sub esterço, em manter a direção pretendida pelo condutor no caso de veículos automotores; e

b) controle de rolagem: designa uma função no âmbito do controle de estabilidade do veículo, a qual, dentro dos limites físicos do veículo, reage a uma situação de rolagem iminente a fim de estabilizar o veículo automotor, em condições de manobras dinâmicas.

Tabela 2 - Classificação dos veículos conforme norma brasileira

Categoria	Características
M	Veículo automotor que contém pelo menos quatro rodas, projetado e construído para o transporte de passageiros.
M1	Veículo projetado e construído para o transporte de passageiros que tenha até oito assentos, além do assento do motorista.
M2	Veículo projetado e construído para o transporte de passageiros que tenha mais que oito assentos, além do assento do motorista, e que tenha massa de até 5 t.
M3	Veículo projetado e construído para o transporte de passageiros que tenha mais que oito assentos, além do assento do motorista, e que tenha massa superior a 5 t.
N	Veículo automotor que contém pelo menos quatro rodas, projetado e construído para o transporte de cargas.
N1	Veículo projetado e construído para o transporte de cargas e que tenha massa de até 3,5 t.
N2	Veículo projetado e construído para o transporte de cargas e que tenha massa superior a 3,5 t e até 12 t.
N3	Veículo projetado e construído para o transporte de cargas e que tenha massa superior a 12 t.
O	Reboque ou semirreboque.
O3	Reboque ou semirreboque com massa superior a 3,5 t e até 10 t.
O4	Reboque ou semirreboques com massa superior a 10 t.

Fonte : Adaptado da Resolução N° 954: 2022

Iombriller et. Al. (2019 apud Batista I.A.A,2021) afirmam que mesmo com a exigência desta tecnologia pela legislação 641:2016 do CONTRAN, até o prezado momento, não existe um padrão ou norma brasileira que especifique testes de validações para estes sistemas, o art.

5° da legislação apenas aponta que o desempenho dos sistemas deve estar de acordo com normas internacionais, seja a norma americana FVMSS no. 136 ou a Resolução europeia no. UN R13. Porém, o Brasil possui algumas configurações e características em seus veículos de carga e condições de estradas bem divergentes do restante do mundo, principalmente do mercado europeu e americano, por este motivo essa tecnologia poderá não ter um bom desempenho em configurações de semirreboques nacionais, tornando indicado e necessário a criação de uma legislação ou norma brasileira que caracterize o desempenho dessa tecnologia para as particularidades no país.

2.4 TESTES REAIS DE LIMITE DE TOMBAMENTO

Segundo Winkler (2000), o teste estático mais utilizado é o de inclinação de mesa (*Tilt Table Experiment*), nele é possível determinar a inclinação máxima que um veículo pode suportar, ou seja, obter o momento no qual se inicia o tombamento. O ensaio consiste em inclinar o veículo gradativamente sobre uma mesa até que os pneus do lado externo percam contato com a superfície.

Figura 9 - Teste de inclinação de mesa.



Fonte: INSTALAÇÕES.

Conforme Meyer (2019), outra maneira de se compreender o real comportamento do veículo, é através da realização de testes dinâmicos em pista de testes. Porém para isso é necessário o preparo do veículo com carregamento da carga, sensores, acelerômetros, dispositivos de segurança para a limitação do tombamento, além disso exige pilotos de teste profissionais para a realização das manobras. Dessa maneira uso da modelagem computacional para prever o comportamento do veículo de forma virtual, está cada vez mais sendo empregada.

Figura 10 - Teste dinâmico em pista de teste



Fonte: Meyer (2019)

Porém quando se deseja analisar o correto funcionamento de um produto, que neste trabalho consiste em uma válvula moduladora, ilustrada com mais detalhes na Figura 11, na qual tem a função principal de controlar a rolagem do veículo, torna-se inadequado tanto a análise virtual, como o teste de inclinação de mesa por não levar em consideração a velocidade do veículo, uma das características mais importantes para o reconhecimento do real risco de tombamento, tornando-se a análise dinâmica em pista a opção mais adequada, neste caso.

3 PROPOSTA DE TRABALHO

A seção 3.1 deste capítulo traz as características do produto testado, já a seção 3.2 apresenta as fases para o desenvolvimento deste trabalho, assim como os procedimentos realizados em cada etapa, sendo discutidos mais detalhadamente na sequência.

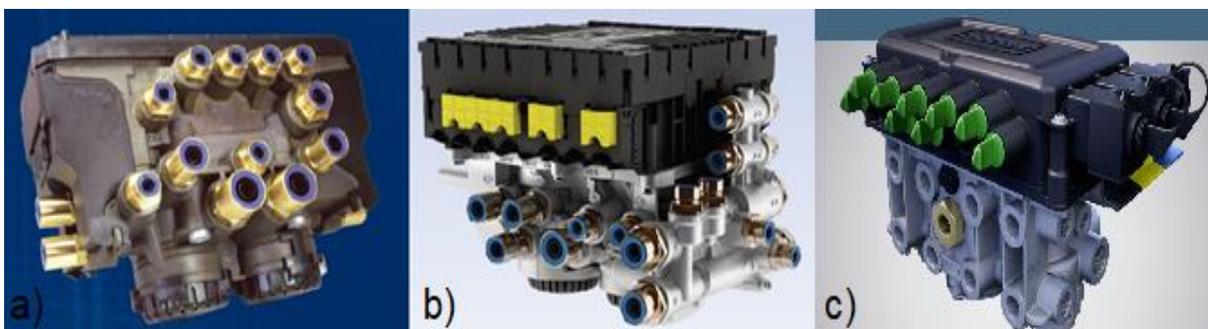
3.1 OBJETO DE ESTUDO

Neste trabalho o ponto a ser analisado é o Limite de tombamento de um semirreboque graneleiro, que devido a novas normas passará a contar com o auxílio de uma válvula moduladora conhecida como EBS (Electric Brake System), ou TEBS quando instalado em reboques e semirreboques (Trailer). Para isso, primeiramente foi analisado como o semirreboque se comportou durante as manobras específicas, e somente após isso, instalada a válvula e todos os testes refeitos para obter a certificação do correto funcionamento do sistema.

Os testes foram realizados com este tipo de válvula pois a mesma conta, dentre outras funções, com o RSS (Rollover Stability System) também conhecido por outras duas siglas, RSC (Rollover Stability Control) e RSP (Rollover Stability Program), ou sistema de controle de estabilidade antitombamento, desta forma o veículo estará de acordo com a resolução N° 954 do CONTRAN possuindo o controle de rolagem descrito na mesma.

Vale ressaltar, que por motivos de confidencialidade a marca e o modelo da válvula testada não poderá ser divulgado, contudo a figura 11 ilustra três modelos dos principais fabricantes: a) Knorr Bremse, b) Wabco e c) Haldex como exemplo.

Figura 11 - Válvulas moduladoras TEBS

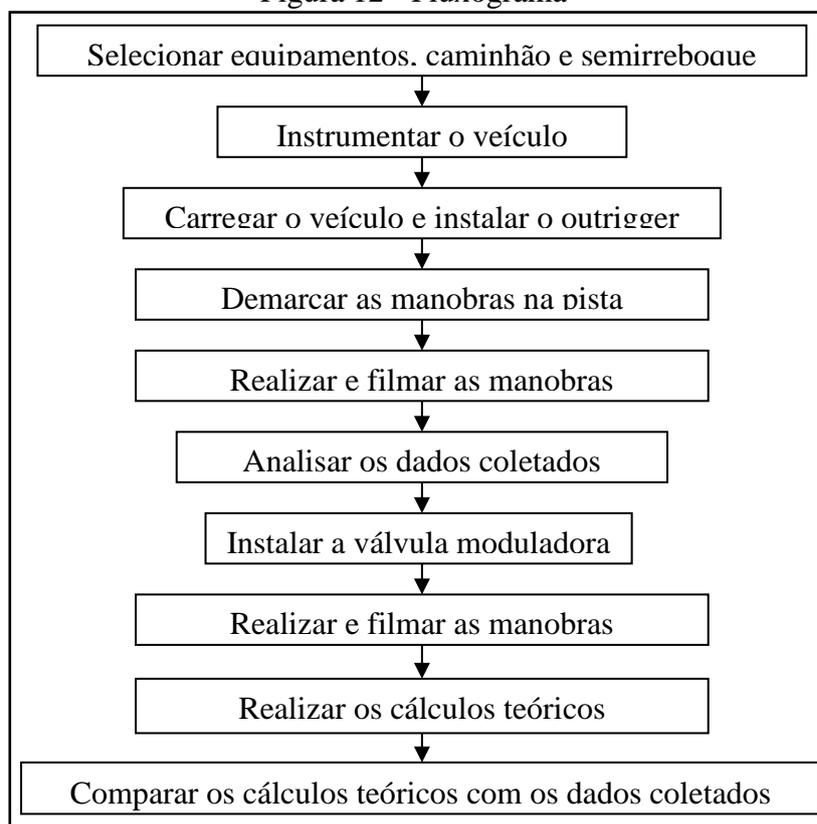


Fonte: Adaptado de Knorr-Bremse (2010), Meritor Wabco (2012) e Haldex (2022)

3.2 FASES DE DESENVOLVIMENTO

As atividades desenvolvidas ocorreram de acordo o fluxograma apresentado na figura 12.

Figura 12 - Fluxograma



Fonte: O autor

3.2.1 Selecionar equipamentos, caminhão e semirreboque

Primeiramente foram selecionados o caminhão e o semirreboque graneleiro, este por sua vez precisou estar totalmente carregado de acordo com a etapa 3.2.3. Nesta etapa também houve a separação de todos os equipamentos que foram utilizados para o teste, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Materiais utilizados

Materiais utilizados			
Quantidade	Nome	Marca	Calibração
1	HUB de internet	Intelbras	-
1	Notebook	Dell - CTR	-
1	Caixa de alimentação 12 e 24 v	CTR	-
1	Sistema de aquisição de dados	HBM - Quantum	ok
2	Transdutores de pressão	HBM	ok
1	Gps Speed sensor	Racelog	ok
1	Acelerômetro	PCB Piezotronics	ok

Fonte: O autor

3.2.2 Instrumentar o veículo

Para a instrumentação do veículo todos os itens dispostos na tabela acima foram instalados nos seus respectivos lugares, e ligados de tal forma que todos pudessem se comunicar de forma adequada, podendo com isso retirar desse conjunto de equipamentos os dados necessários para os resultados do teste.

Figura 13 - Instrumentação no veículo



Fonte: O autor

Cada um dos equipamentos utilizados possui uma função necessária e muito importante neste teste, por exemplo, os transdutores de pressão instalados nas câmeras do freio de serviço do segundo eixo, têm como função principal demonstrar a pressão utilizada em cada lado do sistema de freio do semirreboque. Vale ressaltar que na maioria dos semirreboques, incluindo o deste trabalho, são apenas 2 sensores de velocidade (configuração 2S/2M), ou seja, um sensor e um módulo para cada lado do implemento, com isso o sinal recebido pelo primeiro

e terceiro eixo é o mesmo recebido pelo segundo, porém, o sinal recebido pelo lado direito é independente do lado esquerdo e vice-versa.

Já o equipamento empregado para atuar no processamento e armazenagem dos dados dos ensaios experimentais foi um quantum da marca HBM, o mesmo possui 8 canais, podendo receber diversas formas de sinais como: temperatura, pressão, velocidade, entre outros que não são utilizados para este tipo de avaliação.

Outra informação importante neste teste é a aceleração lateral, para a coleta dessa informação fez-se necessário a instalação de um acelerômetro próximo a posição na qual foi instalada o módulo TEBS. Vale ressaltar que a posição do acelerômetro não foi alterada entre os dois testes.

3.2.3 Carregar o veículo e instalar o outrigger

Para a realização do teste o veículo necessitou estar carregado conforme especificações, para isso foram dispostas caixas sobre o implemento rodoviário, distribuídas de tal forma a obedecer ao limite máximo de carga em cada conjunto de eixos conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela padrão das massas

Configuração do conjunto	Massa por conjunto de eixos (Kg)	PBT (kg)	PBT + 5% de tolerância (Kg)
	6.000 + 17.000 + 25.500	48.500	50.925

Fonte: Adaptado de PORTAL.

O conjunto no qual foi testado possui a configuração mais comum utilizada no transporte rodoviário, ou seja, é utilizado um caminhão 6x2, o qual reboca um semirreboque 3 eixos. Vale ressaltar que o semirreboque a ser utilizado para o teste é o modelo 1+3 eixos, contudo o primeiro eixo no qual é móvel e equipado com suspensão pneumática não foi colocado pneus, tornando-se um eixo inativo resultando em um semirreboque 3 eixos, melhor descrito na tabela abaixo.

Tabela 5 - Informações gerais sobre o veículo do teste

Cavalo mecânico	
Marca /Modelo do caminhão	DAF / XF FTS 6x2
Categoria do veículo	N3 - Veículo para transp. de carga com massa superior a 12t.
Altura do CG	1,45 m
Tipo de suspensão	Mecânica
Semirreboque	
Marca/Modelo do semirreboque	RANDON / SR 1+3
Categoria do veículo	O4 - semirreboque massa superior a 10t
Altura do CG (Vazio)	0,876 m
Tipo de suspensão	1° eixo pneumática 2°,3° e 4° eixos mecânica
Condição de Carga	Totalmente caregado

Fonte: O autor

Figura 14 - Veículo utilizado no teste

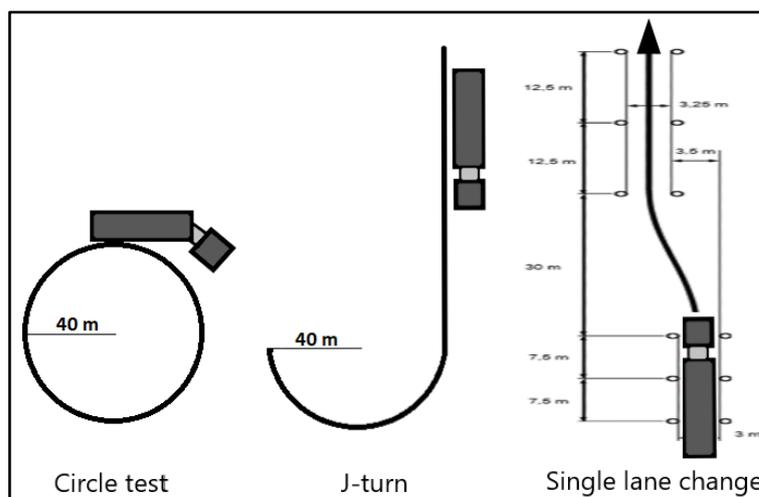


Fonte: O autor

3.2.4 Demarcar as manobras na pista

Para a realização dos testes foram reproduzidas as manobras Steady State Circular Test, também conhecida por Circle test, J-turn e single lane change. O circle test leva em conta a norma ISO 4138, na qual o veículo percorre a trajetória de um círculo de raio constante, elevando sua velocidade progressivamente enquanto os dados são coletados. Já a manobra J-turn o veículo percorre o trajeto com velocidade constante, aumentando sua velocidade a cada nova passagem na pista. E por fim o teste single lane change que é baseado no teste Double lane change conforme norma ISO 3888-1, este por sua vez também é percorrido com velocidade constante, adicionando velocidade a cada novo acesso.

Figura 15 - Manobras



Fonte: O autor

3.2.5 Realizar e filmar as manobras

A realização das manobras ocorreu na pista de VDA do CTR, para isso contou com toda estrutura presente no local, destes pilotos profissionais, fiscal de pista e toda o apoio da equipe de segurança. Para complementar futuras análises os testes foram filmados assim como também, na etapa 3.2.8.

3.2.6 Analisar os dados coletados

O primeiro monitoramento ocorreu no mesmo instante do teste, garantindo assim que o teste se sucedia de forma correta e segura. Tendo a primeira parte dos testes por encerrada foi feita a análise das informações visando examinar os dados coletados e também encontrar possíveis discordâncias.

3.2.7 Instalar a válvula moduladora

A instalação da válvula moduladora ocorreu conforme manual de instruções do fabricante, sendo a mesma fixada na posição correta e tendo suas configurações editadas conforme descrito no mesmo.

3.2.8 Realizar e filmar as manobras

Estando o veículo equipado com a válvula moduladora e nas mesmas condições no qual encerrou a primeira bateria de teste, todo o teste foi refeito a fim de comparar e comprovar como o sistema funciona e com isso tirar as conclusões nas próximas etapas.

3.2.9 Realizar os cálculos teóricos

A elaboração dos cálculos teóricos foi realizada no software Excel e os resultados estão expressos na Tabela 16. Esta tabela é fundamentada nas seguintes equações: (7) fator de atrito lateral demandado por veículos pesados; (13) Limite de tombamento lateral geométrico; (14) limite de tombamento lateral estático.

A equação (16) na qual representa o limite de tombamento lateral para um veículo bidimensional flexível não consta na tabela dos resultados, pois para uma correta análise seria necessário a instalação de outros dispositivos de medição, no qual teriam a função de determinar o ângulo de rolagem da parte superior em relação a parte inferior do semirreboque, porém estes dispositivos não fazem parte do propósito do teste contratado. Vale ressaltar que neste caso a aceleração lateral, certamente sofreria uma diminuição pelo novo fator, tornando-o mais realista conforme apontado.

3.2.10 Comparar os cálculos teóricos com os dados coletados

A última etapa representa o comparativo dos dois testes experimentais realizados, juntamente com a comparação dos dados retirados da bibliografia. Com isso pôde ser feita toda a análise do funcionamento do sistema e assim retirado as conclusões necessárias, podendo também servir como base de outros estudos e trabalhos que envolvam este assunto.

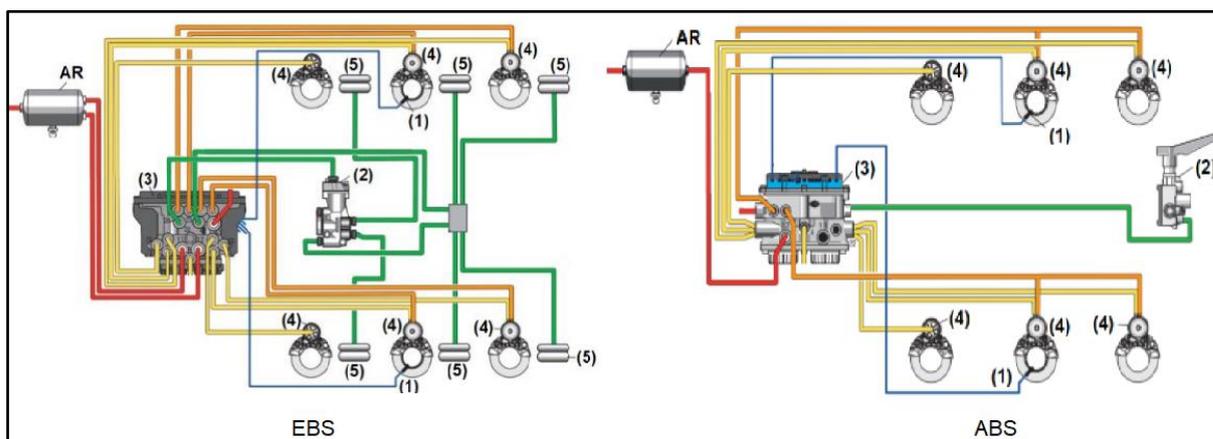
4 RESULTADOS E DISCUÇÕES

Primeiramente na seção 4.1 deste capítulo são apresentadas algumas informações importantes sobre o funcionamento do sistema TEBS que poderão auxiliar na compreensão dos gráficos dos testes executados. Já a próxima seção 4.2, tratará dos resultados dos testes realizados na pista, e por final a seção 4.3 abordará a comparação dos dados teóricos com os resultados encontrados nos testes experimentais.

4.1 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA TEBS

Primeiramente antes de analisar os resultados é indispensável observar o funcionamento do sistema a ser analisado. Segundo Knorr-Bremse (2010), o conceito do sistema EBS é semelhante ao sistema ABS já utilizado atualmente nos semirreboques, ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Sistema EBS x ABS



Fonte: Adaptado de Knorr-Bremse (2010)

Segundo Knorr Bremse (2010), para que o sistema TEBS com a função RSS possa detectar a condição de tombamento, são necessárias algumas informações que são coletadas instantaneamente conforme o veículo se desloca, sendo assim capaz de reagir antes que a condição se torne crítica. Essas variáveis chamadas de variáveis de entrada, são recebidas pelo módulo da seguinte maneira:

- Aceleração Lateral: É obtida através de um acelerômetro montado junto com o circuito interno no módulo TEBS, representado pelo número (3) na Figura 16.

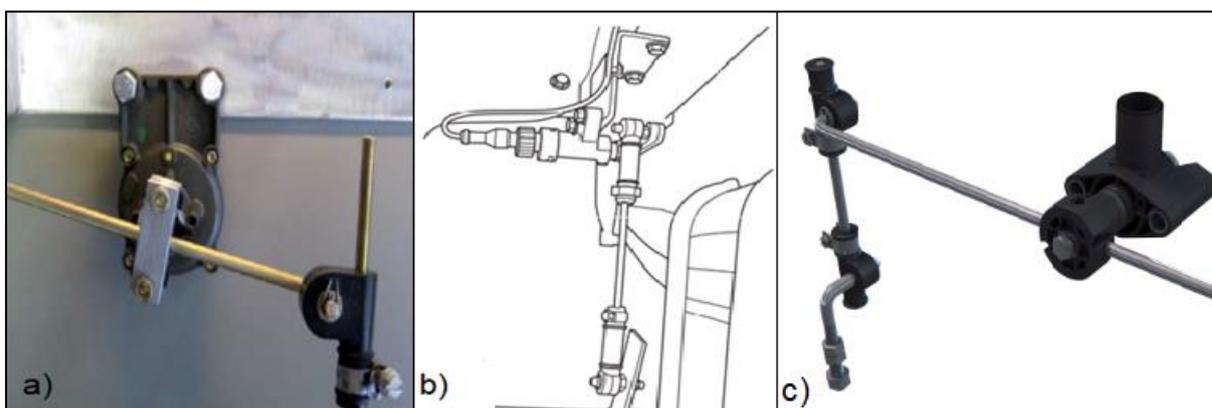
- Velocidade do veículo: As informações da velocidade já são utilizadas atualmente pelos sistemas ABS, ela é recebida pelo módulo através de sensores de velocidade na roda (1).

Na maioria dos semirreboques, incluindo o deste trabalho, são apenas 2 sensores (configuração 2S/2M), ou seja, um sensor e um módulo para cada lado do implemento.

- Carga no eixo: Essa informação para veículos com suspensão pneumática está disponível a partir da leitura da pressão da mola pneumática da suspensão (5). Segundo Guia do TRC (2016) a suspensão pneumática domina 90% do mercado europeu e cerca de 50% do mercado americano, enquanto no Brasil devido ao seu elevado preço, ocupam no máximo 10% do mercado. Os sistemas TEBS são baseados em soluções desenvolvidas para os mercados europeus e americanos, onde a frota é majoritariamente composta por veículos com suspensão por bolsões de ar.

Sabendo que no Brasil a grande maioria dos semirreboques são equipados com suspensão mecânica, assim como o semirreboque deste trabalho, visto também que a carga no eixo é uma variável importante para a efetividade do sistema, desta forma foi necessário o uso de um dispositivo adaptador que monitora constantemente a deflexão do feixe de mola, chamado de: a) Sensor de altura (Wabco), b) Sensor de deflexão (Knorr Bremse), c) sensor de altura eletrônico (Haldex), conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Sensor para veículos com suspensão mecânica



Fonte: Adaptado de Knorr-Bremse (2010), Meritor Wabco (2012) e Haldex (2022)

Para esse tipo de sensor a deflexão do feixe de mola é convertida em tensão pelo mesmo e lida pelo módulo, para isso é necessário definir a deflexão do feixe de mola (distância linear entre sem carga e com carga), bem como o comprimento da alavanca do sensor, desse modo o sistema estará calibrado para o uso.

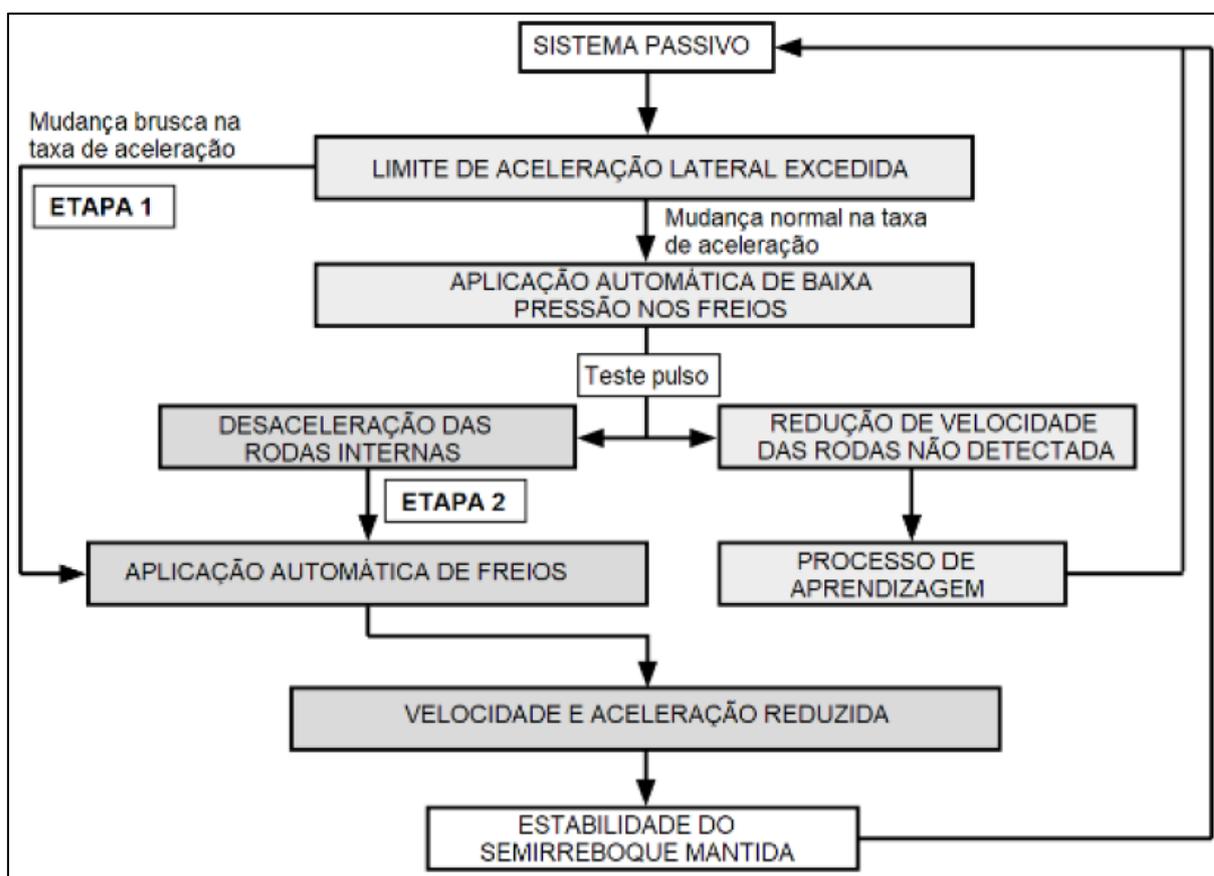
Conforme Wabco (2017) este tipo de sensor possui uma precisão limitada, isso devido principalmente ao seu design. Além disso, a instalação e calibração incorreta dos sensores de altura, também pode ocasionar anomalias no funcionamento do TEBS. Outro ponto a ser

ressaltado é a localização onde ele deve ser instalado, lugar no qual é suscetível a impactos de resíduos principalmente dos pneus que ficam localizados a poucos centímetros deste sensor, podendo provocar com o passar do tempo inúmeras falhas.

Sabendo um pouco de como são originados os sinais dos quais o módulo necessita para seu funcionamento, cabe neste momento uma explicação de como o módulo faz a leitura destes sinais até o momento final, ou seja, a correção de instabilidade.

Quando um veículo se aproxima do limite da aceleração lateral máxima o sistema RSP entra em ação interpretando se realmente existe um risco eminente de tombamento ou não. Para um melhor entendimento o diagrama de blocos abaixo descreve o funcionamento do sistema.

Figura 18 - Diagrama de blocos funcionamento do TEBS



Fonte: Batista (2021)

Segundo Knorr Bremse (2010), o sistema RSP funciona da seguinte maneira:

Etapa 1: Se houver um aumento de forma brusca na aceleração lateral do semirreboque, causada por uma manobra brusca do motorista, ou até mesmo por outros motivos, a função RSP entra em ação e interveem freando as rodas do lado externo a curva até

encontrar uma condição de velocidade e aceleração lateral segura. Nesse caso não há tempo suficiente para realizar a rotina de pulso de teste pois existe uma possibilidade real de tombamento.

O teste de pulso é um teste de aprendizagem do sistema. Quando um limite pré-definido de aceleração lateral é excedido de forma não tão brusca, os freios não são aplicados com a pressão da etapa 1, e sim com uma baixa pressão, aproximadamente 1 bar, isso é realizado automaticamente e repetidamente para avaliar a reação das rodas internas a curva. Se a velocidade da roda diminuir como resultado da aplicação do freio de baixa pressão, fica subentendido que as rodas perderam contato com o solo e com isso o veículo apresenta risco de tombamento, passando assim para a Etapa 2. Por outro lado, se a aplicação do freio de baixa pressão não causar uma redução na velocidade das rodas internas, fica subentendido que as rodas ainda apresentam carga sobre elas, portanto o veículo ainda apresenta condições e estabilidade suficiente para aquela manobra, não resultando com isso na aplicação total dos freios. Neste caso o valor da aceleração lateral do teste de pulso é memorizada, e para os próximos testes já ocorrerá um aumento deste valor, servindo assim como o processo de aprendizagem, recalculando os valores de velocidade e aceleração lateral limite do semirreboque.

Etapa 2: A intervenção de freio nesta etapa sempre seguirá um teste de pulso que resultou em uma redução da velocidade da roda como descrito anteriormente, isso representa que as rodas perderam contato com o solo. Neste caso, fica evidenciado que o semirreboque se encontra em um estado crítico, condição na qual pode fazer o mesmo tombar a menos que a aceleração lateral seja reduzida pela redução da velocidade do veículo. Para isso os freios das rodas externas as curvas são acionadas de forma perceptível, para alcançar a desaceleração correta da combinação e trazer a aceleração lateral para um nível não crítico o mais rápido possível. Para que essa aplicação seja eficiente, a intensidade na qual é aplicado os freios é feita de acordo com a carga e seu acondicionamento dentro do semirreboque, informação aferida pelos sensores da suspensão. Assim que uma condição de deslocamento segura é alcançada, os freios são liberados e o sistema retornará ao sistema passível.

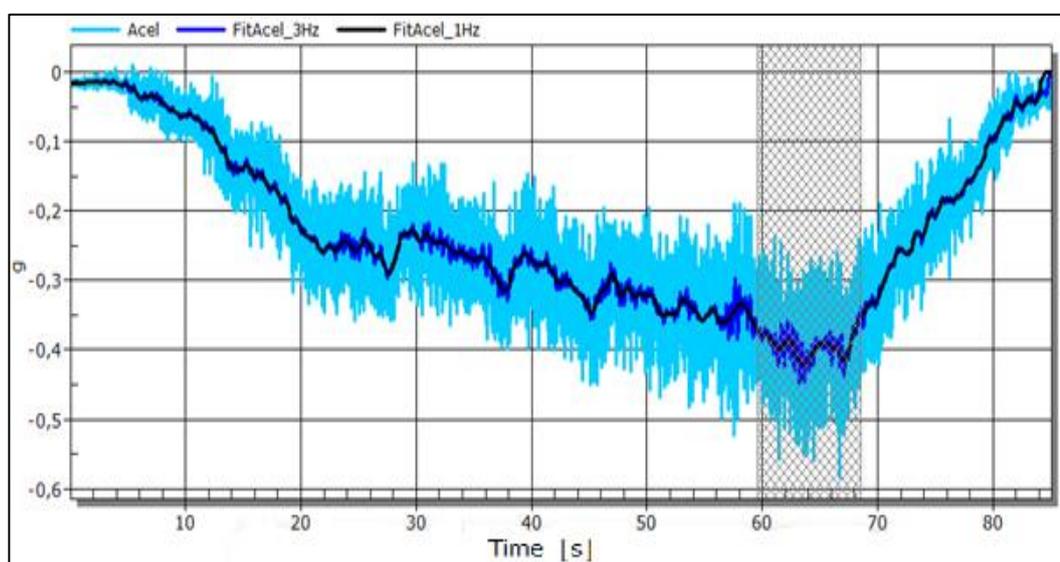
Nos dias atuais, ou seja, com o novo sistema ainda não implantado, mesmo que o motorista tenha se tornado ciente de um potencial risco de tombamento durante uma manobra, é muito provável que seja tarde demais para ele reduzir a velocidade do veículo a tempo suficiente para evitar um acidente. Já com esse novo sistema é bem possível que o motorista aplique os freios antes ou durante uma intervenção RSP, nesse caso o módulo de freio TEBS

compara a pressão de atuação do freio pelo motorista com a pressão gerada automaticamente pela função RSP, a pressão aplicada nos freios será sempre a maior dos dois valores.

4.2 RESULTADO DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Primeiramente, antes de analisar os resultados foi necessário filtrar os sinais originais da aceleração lateral. A aplicação deste filtro se deve ao fato que o sinal enquanto é coletado sofre interferência de alguns ruídos que atrapalham sua leitura e compreensão. Após filtrado, esses ruídos ficam ocultos facilitando a análise do mesmo, sendo demonstrado um exemplo dessa interferência na Figura 19 e Tabela 6.

Figura 19 - Consequência da variação do filtro



Fonte: O autor

Tabela 6 - Resultados conforme variação do filtro

	Acel	FitAcel_1Hz	FitAcel_3Hz
t1	59,541 s	59,541 s	59,541 s
t2	68,492 s	68,492 s	68,492 s
Minimum	-0,5842 g	-0,4208 g	-0,4471 g
Maximum	-0,2383 g	-0,3557 g	-0,3504 g
Mean value	-0,3948 g	-0,3946 g	-0,3947 g

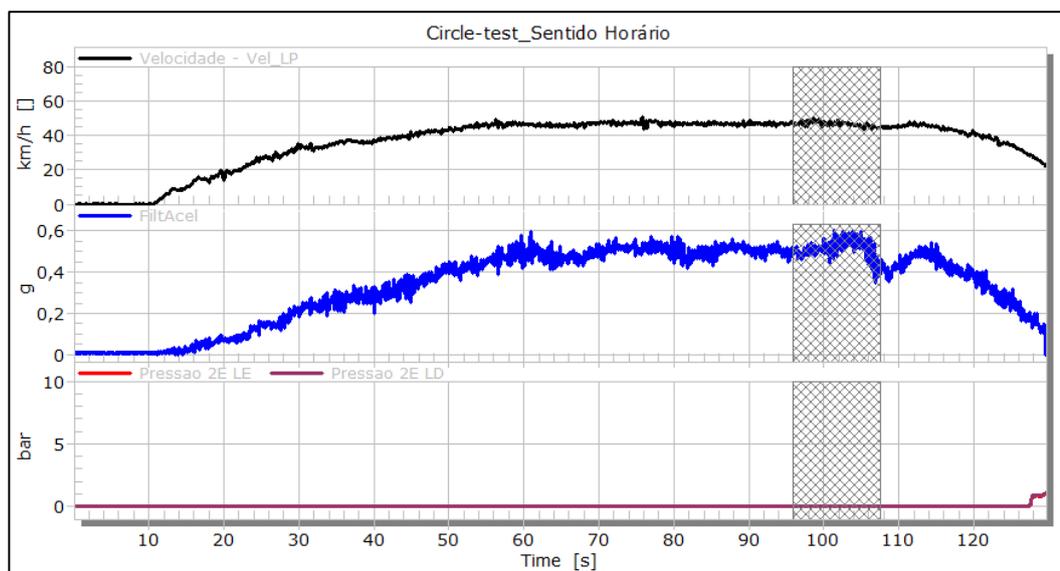
Fonte: O autor

4.2.1 Steady state circular test

O primeiro teste realizado foi o Circle test, a Figura 20 e Figura 21 representam a manobra no sentido horário e seus respectivos resultados são expressos na Tabela 7 e Tabela 8. Já a Figura 22 e Figura 24 representam a manobra no sentido contrário, tendo seus resultados

expressos na Tabela 9 e Tabela 10. Vale ressaltar que o filtro utilizado na análise dos gráficos e observado a partir da Figura 20 com o nome de (FiltAcel) apresenta frequência de corte de 2Hz.

Figura 20 - Manobra circle test sentido horário - Sem TEBS



Fonte: O autor

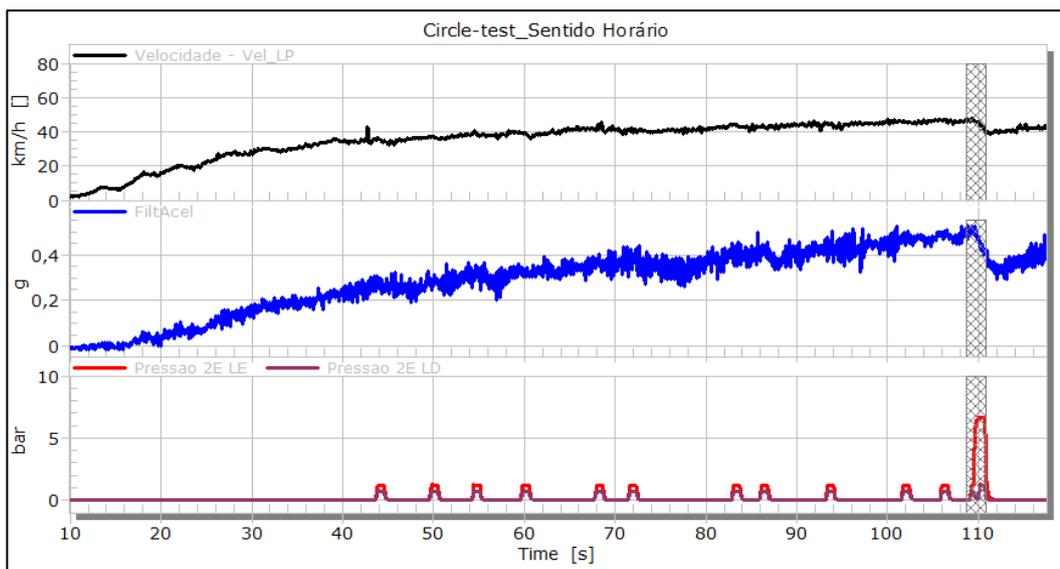
Tabela 7 - Resultados da manobra circle test sentido horário - Sem TEBS

	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	95,809 s	95,809 s	95,809 s	95,809 s
t2	107,459 s	107,459 s	107,459 s	107,459 s
Minimum	43,76	0,3457 g	-0,00250 bar	-0,00146 bar
Maximum	49,75	0,6051 g	0,00222 bar	0,00277 bar
Mean value	46,50	0,5124 g	-0,00019 bar	0,00070 bar

Fonte: O autor

Após instalado o TEBS a primeira manobra realizada foi o circle test sentido horário, como demonstrado na Figura 21, nela é possível visualizar o processo de aprendizagem do sistema, no qual teve início no instante 44 segundos, sendo representado por pequenos degraus com 1 bar de pressão aproximadamente, conforme descrito anteriormente. As áreas hachuradas das figuras sem o TEBS representam o SRT do veículo em cada manobra, enquanto nas figuras que representam o veículo com o TEBS essas áreas representam o momento onde o sistema começa a atuar com pressão total, evitando assim que o veículo se aproxime do seu SRT. Neste caso o sistema interviu freando as rodas do lado externo a curva, levando aproximadamente menos de 3 segundos para a estabilização total do semirreboque, assim como na Figura 24 que representa o sentido contrário.

Figura 21 - Manobra circle test sentido horário - Com TEBS



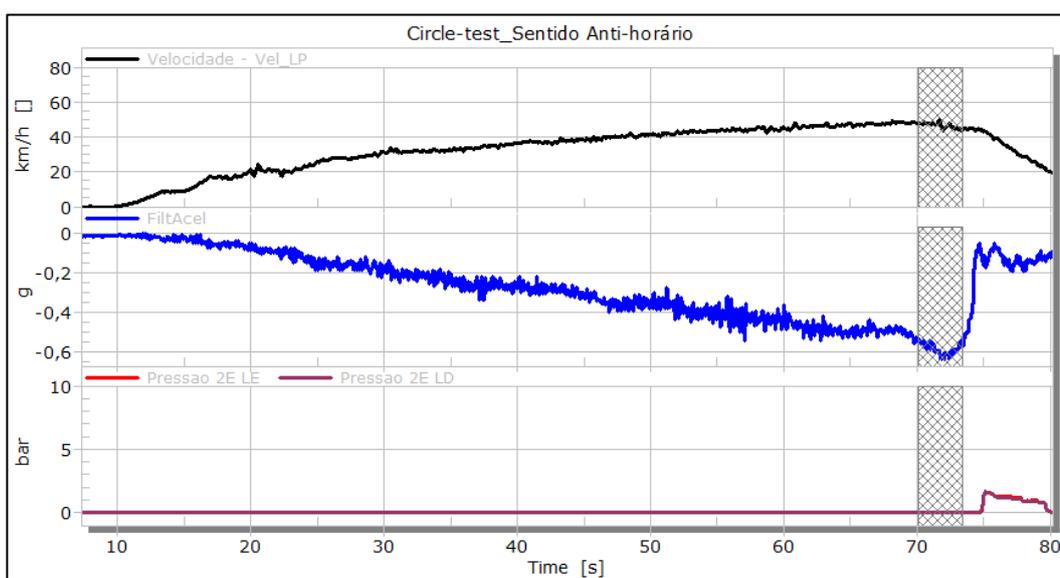
Fonte: O autor

Tabela 8 - Resultados da manobra circle test sentido horário - Com TEBS

	Vel_LP	FiltAcel	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	103,512 s	103,512 s	103,512 s	103,512 s
t2	109,494 s	109,494 s	109,494 s	109,494 s
Minimum	44,14	0,4334 g	-0,00448 bar	-0,00487 bar
Maximum	47,62	0,5246 g	1,796 bar	0,7434 bar
Mean value	46,22	0,4807 g	0,2485 bar	0,1515 bar

Fonte: O autor

Figura 22 - Manobra circle test sentido anti-horário - Sem TEBS



Fonte: O autor

Tabela 9 - Resultados da manobra circle test sentido anti-horário - Sem TEBS

	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	70,149 s	70,149 s	70,149 s	70,149 s
t2	73,458 s	73,458 s	73,458 s	73,458 s
Minimum	43,31	-0,6427 g	0,00239 bar	-0,00026 bar
Maximum	50,19	-0,5391 g	0,00591 bar	0,00268 bar
Mean value	46,52	-0,5884 g	0,00416 bar	0,00116 bar

Fonte: O autor

Excepcionalmente nessa manobra houve o contato do pneu do outrigger com a pista. Com isso houve a necessidade de analisar o momento exato do limite de tombamento lateral, ou seja, o momento em que as rodas do lado interno perderam contato com o solo sem encostar o pneu do outrigger. Para isso foi analisado as filmagens realizadas durante as coletas para encontrar o ponto exato.

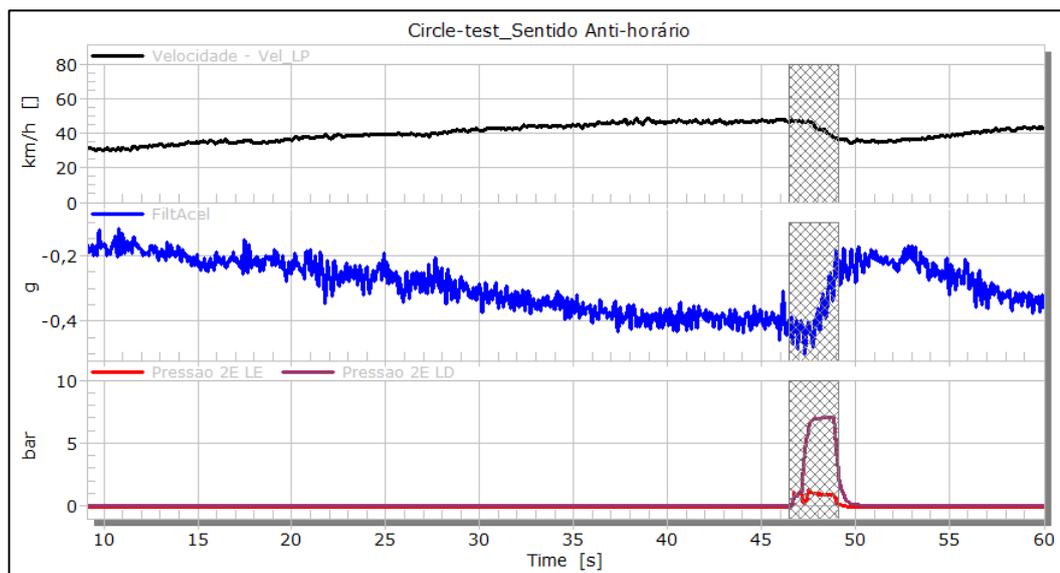
A Figura 23 ilustra o momento em que as rodas perdem contato com a pista sendo representado pela imagem a), sendo este o verdadeiro SRT, localizado aproximadamente 2 segundos antes da aceleração máxima representada na Tabela 9 e ilustrada na imagem b), a partir desse ponto houve a desaceleração do conjunto. Com isso o verdadeiro valor da aceleração lateral é aproximadamente -0,55g e não -0,64g.

Figura 23 - Análise da manobra circle test sentido anti-horário



Fonte: O autor

Figura 24 - Manobra circle test sentido anti-horário - Com TEBS



Fonte: O autor

Tabela 10 - Resultados da manobra circle test sentido anti-horário - Com TEBS

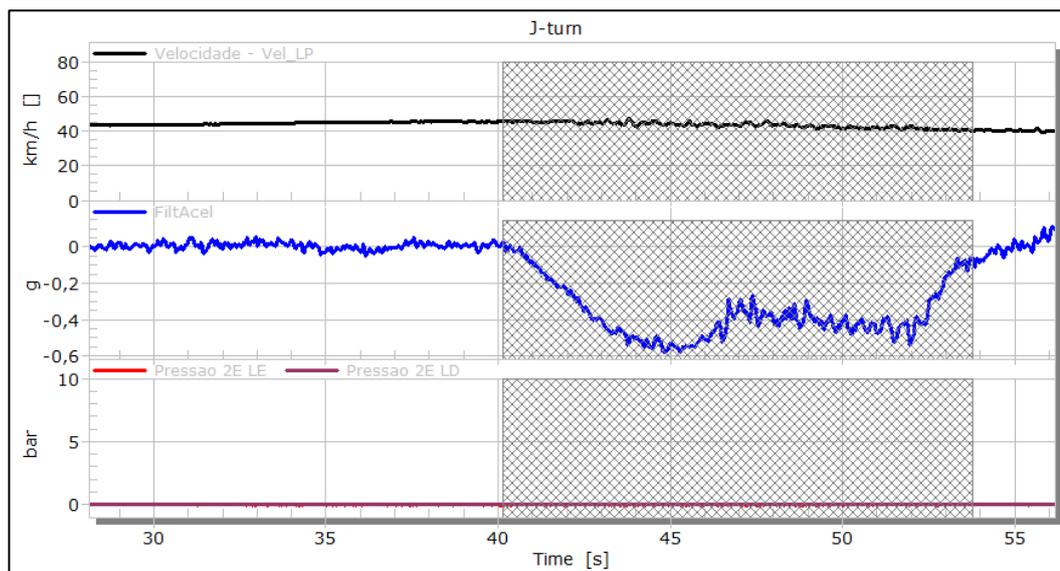
	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	46,457 s	46,457 s	46,457 s	46,457 s
t2	48,636 s	48,636 s	48,636 s	48,636 s
Minimum	39,38	-0,5010 g	-0,04558 bar	-0,00727 bar
Maximum	47,56	-0,2515 g	1,272 bar	7,019 bar
Mean value	44,83	-0,4085 g	0,7868 bar	4,440 bar

Fonte: O autor

4.2.2 J-turn

O teste J-turn realizado está representado a seguir pela Figura 25 e Figura 26, enquanto os resultados estão expressos na Tabela 11 e Tabela 12. É possível notar na Figura 26 que o acionamento total dos freios seguiu um pulso de teste no qual detectou uma redução da velocidade da roda conforme descrito na Etapa 2 da Figura 18, esse sinal resultou na estabilização do veículo, aproximadamente 1,5 segundos após o início do teste de pulso que ocorreu no instante 62 segundos, sendo assim evitou que o mesmo apresentasse risco de tombamento.

Figura 25 - Manobra J-turn - Sem TEBS



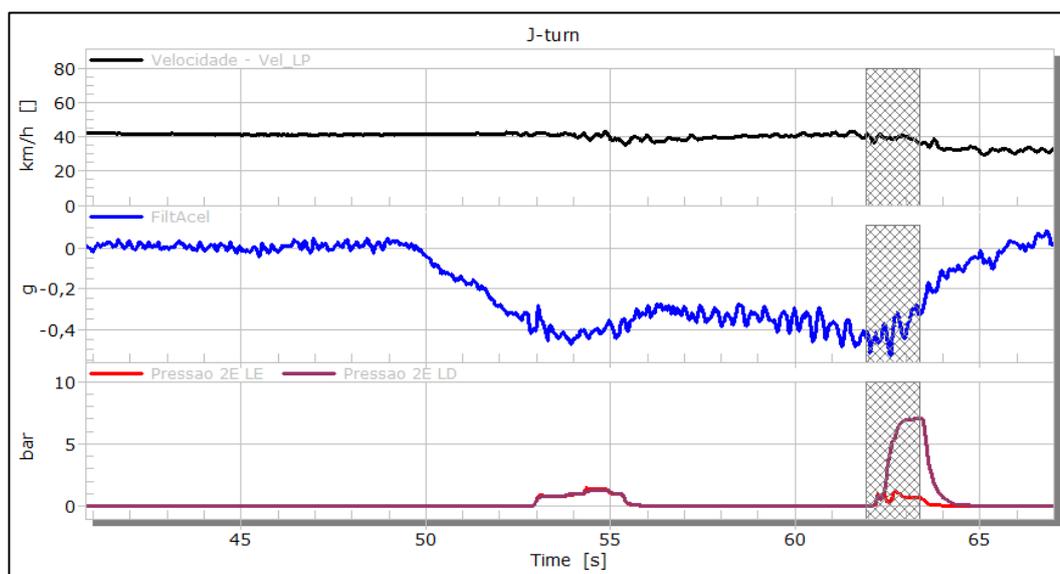
Fonte: O autor

Tabela 11 - Resultados da manobra J-turn - Sem TEBS

	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	40,154 s	40,154 s	40,154 s	40,154 s
t2	53,795 s	53,795 s	53,795 s	53,795 s
Minimum	39,86	-0,5814 g	-0,02751 bar	-0,00550 bar
Maximum	47,18	0,02700 g	-0,02170 bar	0,00039 bar
Mean value	43,39	-0,3646 g	-0,02530 bar	-0,00242 bar

Fonte: O autor

Figura 26 - Manobra J-turn - Com TEBS



Fonte: O autor

Tabela 12 - Resultados da manobra J-turn - Com TEBS

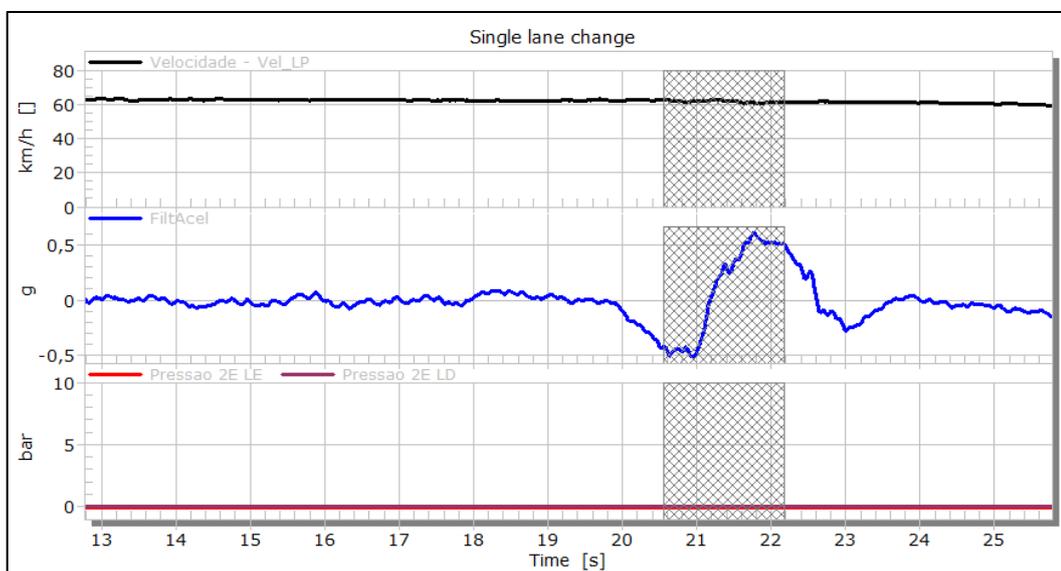
	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	61,972 s	61,972 s	61,972 s	61,972 s
t2	63,425 s	63,425 s	63,425 s	63,425 s
Minimum	36,03	-0,5292 g	0,01091 bar	-0,00057 bar
Maximum	41,32	-0,2813 g	1,296 bar	7,017 bar
Mean value	38,98	-0,3972 g	0,6496 bar	4,235 bar

Fonte: O autor

4.2.3 Single lane change

Por último foi realizada a manobra Single lane change, essa manobra provoca uma variação brusca na aceleração lateral do semirreboque, a Figura 27 e a Figura 29 demonstram o comportamento de semirreboque durante a manobra, enquanto a Tabela 13 e a Tabela 15 trazem os resultados deste teste. A Figura 28 por sua vez retrata o sistema realizando o teste de pulso, no qual resultou a não aplicação total dos freios, decorrente do sistema compreender que para tal velocidade e aceleração lateral não haveria risco de tombamento.

Figura 27- Manobra single lane change - Sem TEBS



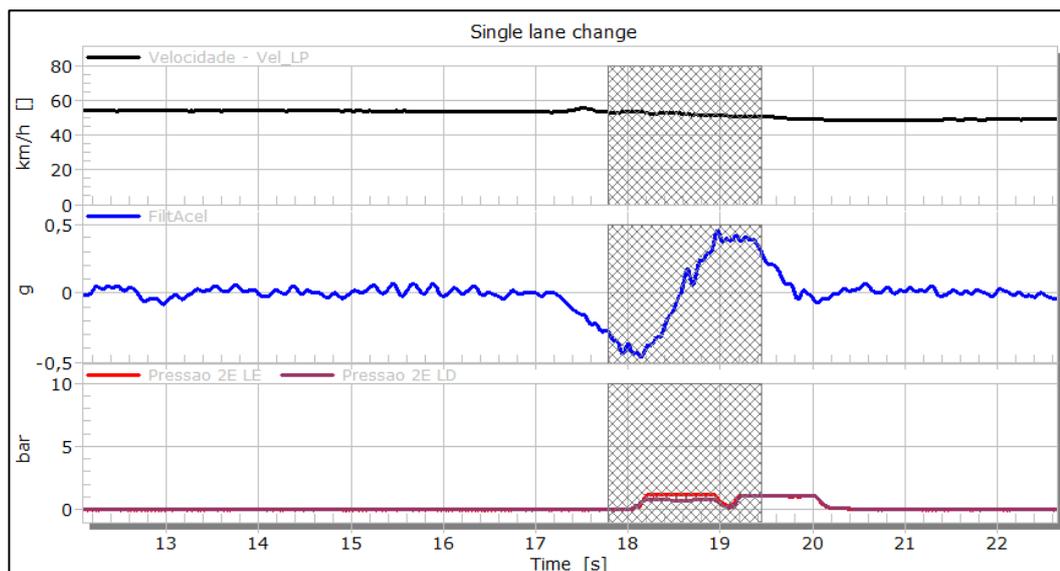
Fonte: O autor

Tabela 13 - Resultados da manobra single lane change - Sem TEBS

	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	20,462 s	20,462 s	20,462 s	20,462 s
t2	22,067 s	22,067 s	22,067 s	22,067 s
Minimum	60,29	-0,5112 g	-0,03712 bar	-0,00629 bar
Maximum	62,99	0,6110 g	-0,03111 bar	-0,00218 bar
Mean value	61,74	0,04066 g	-0,03379 bar	-0,00428 bar

Fonte: O autor

Figura 28 - Manobra single lane change - Teste de pulso



Fonte: O autor

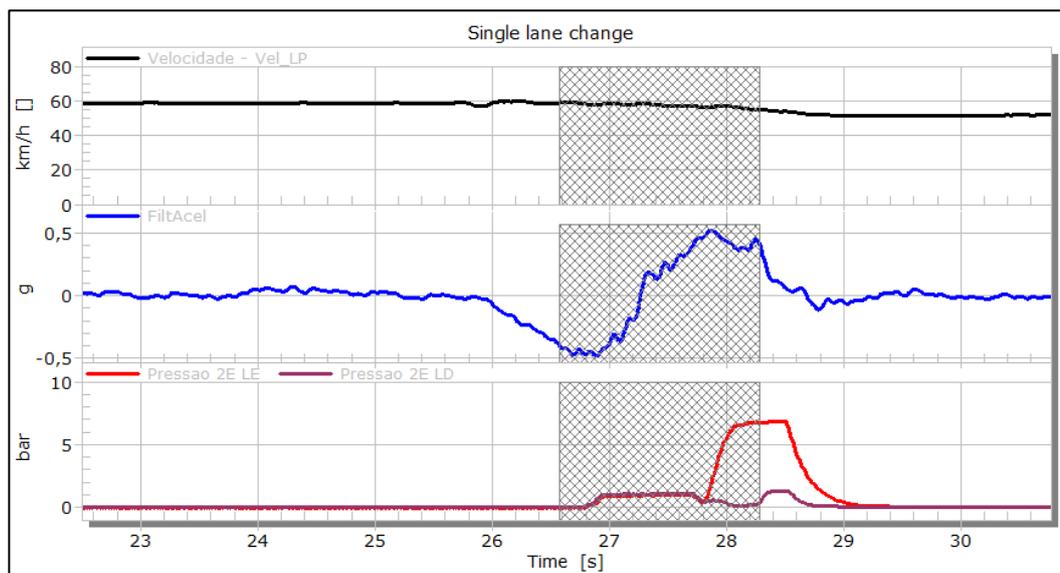
Tabela 14 - Resultados da manobra single lane change - Teste de pulso

	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	17,788 s	17,788 s	17,788 s	17,788 s
t2	19,451 s	19,451 s	19,451 s	19,451 s
Minimum	50,46	-0,4622 g	-0,02670 bar	-0,00187 bar
Maximum	53,78	0,4520 g	1,207 bar	1,113 bar
Mean value	51,99	0,00864 g	0,8238 bar	0,6044 bar

Fonte: O autor

A figura abaixo representa o ponto limite no qual o sistema começa a atuar para essa manobra, nela é possível observar que houve um aumento brusco na aceleração lateral do semirreboque no momento de transição da manobra, neste ponto há transferência de carga das rodas do lado direito onde percebe-se a realização do teste de pulso, para as rodas do lado esquerdo, sendo que neste caso não houve tempo hábil para a realização desse teste, ou seja a verificação do contato dos pneus com a pista, com isso o sistema RSP interviu diretamente na etapa 1 conforme descrito na Figura 18, freando as rodas do lado externo a manobra, sendo representado entre os instantes 27,8 e 28,6 segundos na Figura 29. Dentro desse intervalo de aproximadamente 1 segundo ocorreu a estabilização e posteriormente redução da aceleração lateral na qual resultou na correção da estabilidade do veículo.

Figura 29 - Manobra single lane change - Com TEBS



Fonte: O autor

Tabela 15 - Resultados da manobra single lane change - Com TEBS

	Vel_LP	FiltAcele	Pressao 2E LE	Pressao 2E LD
t1	26,579 s	26,579 s	26,579 s	26,579 s
t2	28,287 s	28,287 s	28,287 s	28,287 s
Minimum	54,88	-0,4820 g	-0,02815 bar	-0,00222 bar
Maximum	59,06	0,5237 g	6,809 bar	1,080 bar
Mean value	57,34	0,05890 g	1,913 bar	0,6393 bar

Fonte: O autor

4.3 COMPARAÇÃO DOS DADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

Nesta etapa são dispostos os resultados e comparações entre o veículo com e sem TEBS, assim como a comparação do veículo sem TEBS com os valores e cálculos encontrados na bibliografia. A Tabela 16 apresenta os resultados das três manobras realizadas pelo veículo sem o TEBS.

Tabela 16 - Resultados do teste experimental

Parâmetros	Manobras sem TEBS				Média
	Circle test - 40 metros		J-turn	Single lane change	
	Anti-horário	Horário			
Fator de atrito lateral demandado [adim.] $f_{dem} = 1,1 (1,15 \frac{v^2}{127 \cdot R})$	0,63	0,62	0,55	-	0,6
Velocidade máxima [km/h]	50,2	49,8	47,2	63,0	52,5
SRT Experimental [g]	0,55	0,61	0,58	0,61	0,59
SRT teórico (estático) [g] $SRT_e = \frac{v^2}{g \cdot R}$	0,50	0,49	0,44	-	0,47
Erro estático [%]	11%	25%	33%	-	23%
SRT teórico (geométrico) [g] $SRT_{geom} = \frac{t}{2 \cdot h}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Erro geométrico [%]	11%	23%	17%	23%	18%

Fonte: O autor

É possível observar que o limite de tombamento lateral resultante do teste experimental sem TEBS ficou igual a 0,59g se considerarmos a média dos 4 testes realizados, sendo assim compatível aos valores apresentados por Gillespie, e superiores aos descritos por Muller e Ejzemberg, conforme ilustrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores encontrados na bibliografia para STR

Limite de tombamento lateral teórico [g]	
Muller	Acima de 0,35
Ejzemberg	Entre 0,30 a 0,38
Gillespie	Entre 0,4 a 0,6

Fonte: O autor

Se analisarmos as equações dispostas na Tabela 16, é possível afirmar que o valor do teste experimental ficou 23% acima do obtido através da equação (14) limite de tombamento lateral estático, e 18% acima do limite de tombamento lateral geométrico, conforme equação (13). Essa diferença pode ter ocorrido pelo fato das equações serem baseados em veículos rígidos, enquanto os testes experimentais levam em consideração um veículo real, ou seja, flexível no qual sofre interferências de outras variáveis como por exemplo: pressão, quantidade e qualidade dos pneus, rigidez do chassi, disposição da carga, rigidez suspensão, entre outros.

Tendo conhecimento do limite de tombamento lateral, cabe aqui uma análise sobre o máximo fator de atrito disponível para que um veículo pesado possa realizar uma manobra sem

deslizar. Sabendo que o limite de tombamento desse veículo é aproximadamente 0,59g, entende-se que o fator de atrito mencionado na etapa 2.2.3 não está coerente, pois caso estivesse o veículo ao se aproximar dos valores informados na Tabela 18 teria escorregado lateralmente, com isso não teria conseguido chegar ao seu limite de tombamento obtido no teste experimental.

Sabendo que o limite de tombamento ficou acima do fator de atrito, pode se deduzir que os valores informados na bibliografia para o fator de atrito são conservadores. Como esse teste foi realizado tendo como peculiaridades pneus e pista em ótimas condições, e também observando que durante alguns testes conforme o veículo se aproximava do limite de tombamento lateral era perceptível um pequeno deslizamento, é possível afirmar que para o semirreboque analisado o valor do fator de atrito está próximo ou acima do limite de tombamento lateral.

Quando comparamos os valores do fator de atrito lateral tendo como base não os valores encontrados na bibliografia mas sim na equação (7), fica confirmado a análise feita, na qual afirma que os valores são próximos ou superiores ao valores do SRT, conforme descrito na Tabela 16.

Tabela 18 - Fator de atrito encontrado na bibliografia

Fator de atrito [adim.]		
Velocidade	50km/h	60 km/h
Bonneson	0,45	0,37
DNIT	0,46	0,44

Fonte: O autor

A respeito da comparação entre o veículo com e sem TEBS a Tabela 19 representa os resultados dos testes realizados, o primeiro representa o limite de tombamento lateral do semirreboque sem o TEBS, já o segundo demonstra os valores máximos da aceleração lateral e velocidade com o veículo equipado com o novo sistema TEBS.

Tabela 19 - Resultados

Limite de tombamento lateral experimental		
Circle test - sentido horário		
	Velocidade máx. [km/h]	Aceleração lateral [g]
SEM TEBS	49,8	0,61
COM TEBS	47,6	0,52
Circle test - sentido anti-horário		
SEM TEBS	50,2	0,55
COM TEBS	47,6	0,5
J-turn		
SEM TEBS	47,2	0,58
COM TEBS	41,3	0,53
Single lane change		
SEM TEBS	63	0,61
COM TEBS	59,1	0,52

Fonte: O autor

Sobre a função RSP disposta no TEBS fica evidente a faixa de atuação do sistema, assim como fica claro o quanto esse produto poderá contribuir para a redução principalmente dos acidentes relacionados a tombamento lateral. Analisando os resultados é possível observar considerando a média dos 4 testes, que o sistema atuou antecipando o SRT em aproximadamente 7% do valor da velocidade máxima, e 12% antevendo a aceleração máxima.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como análise o estudo do limite de tombamento lateral de um semirreboque, sendo realizado através de manobras dinâmicas na pista de testes, a fim de comparar com os dados encontrados da bibliografia e conferir o comportamento do veículo equipado com o novo sistema antitombamento.

Independentemente das novas tecnologias estarem cada vez mais presentes, ainda é responsabilidade do motorista dirigir de acordo com as regras de trânsito, condições da estrada e do tráfego, para que o sistema RSP só intervenha quando absolutamente necessário. O teste experimental do limite de tombamento lateral apresentou resultados superiores ao esperado após a pesquisa bibliográfica. Já o outro teste realizado demonstrou a eficiência do sistema TEBS com a função RSP, no qual atua antecedendo um possível fenômeno de tombamento, sendo assim, é possível afirmar que essa tecnologia poderá contribuir para redução desse fenômeno, porém, é importante mencionar que nenhuma tecnologia é capaz de eliminar completamente a possibilidade de um acidente.

O Brasil possui algumas configurações de veículos de carga divergentes do restante do mundo, a exata efetividade do sistema TEBS no nosso país só será conhecida após alguns anos da sua implementação. Em contrapartida, é indispensável mencionar que por diversos motivos dentre eles a manutenção incorreta, principalmente pela falta de equipamentos e mão de obra qualificada, acarretará também, no aumento da parcela de veículos com o sistema inoperante, assim como já acontece atualmente nos sistemas ABS em circulação.

Uma sugestão para mudar esse fato, e de fato contribuir para a redução crescente desse tipo de acidente, mesmo após alguns anos da implementação da norma, seria uma fiscalização periódica por empresas certificadas no implemento rodoviário.

Como sugestão para próximos trabalhos sugere-se uma análise mais detalhada dos testes com o sistema RSP, ou seja, com um maior número de amostras para cada manobra, resultando com isso uma visualização mais detalhada da margem de acionamento do sistema, assim como também é sugerido testes com outras configurações de carga e de semirreboques, de modo que seja possível observar o quanto a mudança no posicionamento da carga influencia no limite de tombamento de veículos pesados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIDENTES Rodoviários - **Estatísticas Envolvendo Caminhões. Confederação Nacional do transporte.** [S.I].2019. Disponível em:< <https://www.cnt.org.br/pesquisas>>. Acesso em 15 mar. 2022.

BATISTA, Igor Augusto Alves. **Estudo de aplicabilidade e validação de um sensor de quinta roda para monitoramento da dinâmica veicular em caminhões articulados.** Curitiba, 2021

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

BRASIL. **Resolução Nº 641, de 14 de dezembro de 2016.** Diário Oficial da União. Disponível em: < https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/24778911/do1-2016-12-15-resolucao-n-641-de-14-de-dezembro-de-2016-24778825 >. Acesso em: 29 abr. 2022.

_____. **Resolução Nº 954, de 28 de março de 2022.** Diário Oficial da União. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-954-de-28-de-marco-de-202290301426#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20obrigatoriedade%20do,de%20f%C3%A1brica%2C%20nacionais%20e%20importados.>> >. Acesso em: 29 abr. 2022.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas.** Rio de Janeiro, 2010. (IPR. Publ.,740). Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/740_manual_projetos_geometricos_travessias_urbanas.pdf> Acesso em 3 abr. 2022.

EJZENBERG, Sergio. **Os veículos pesados e a segurança no projeto de curvas horizontais de rodovias e vias de trânsito rápido.** São Paulo, 2009.

GUIA DO TRC. **As virtudes da suspensão a ar.** 2016. Disponível em:< <http://www.guiadotrc.com.br/noticias/noticiaid.asp?id=31325>>. Acesso em 04 set. 2022.

GILLESPIE, THOMAS D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics;**Warrendale-USA: Society Automotive Engineers.1992.

HALDEX. **Sensor Eletrônico de Altura (EHS).** 2022. Disponível em:<<https://eu.haldex.com/en/europe/trailer-application-guide/trailer-guide/eb-system/eb-extensions/electronic-height-sensor-ehs/>>. Acesso em 17 set. 2022.

_____. **Installation Guide.** 2021. Disponível em: < https://www.haldex.com/globalassets/europe/documents/ebs-system/006300018_en.pdf>. Acesso em 18 set. 2022.

INSTALAÇÕES de pesquisa de inclinação de veículos pesados. Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá. Disponível em: < <https://navigator.innovation.ca/en/facility/national-research-council-canada/heavy-vehicle-tilt-research-facilities>>. Acesso em 08 de mai. 2022.

INTERNATIONAL standard. **Passenger cars-Steady-state circular driving behaviour-Open-loop test methods**. Disponível em: <<http://www.conforward.cn/ueditor/php/upload/file/20150829/1440814567491032.pdf>>. Acesso em 16 jun. 2022.

KNORR-BREMSE. **Product Manual – Trailer EBS**, 2010. Disponível em: <<https://fddocuments.net/document/tra-i-l-e-r-e-b-s-p-r-o-d-u-c-t-m-a-n-u-a-l-t-e-b-s-g-2-a-p-r-o-d-u-c-t-m-a.html?page=45>>. Acesso em: 21 ago. 2022.

MELO, Rubem Pentead. **Análise dinâmica de veículos articulados com carga líquida**. Curitiba ,2018.

MEYER, Alberto. **Análise da Susceptibilidade a Tombamento em Caminhões e Ônibus**. LinkedIn, 26 jun. 2019. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/analise-da-susceptibilidade-tombamento-em-caminh%C3%B5es-e-alberto-meyer>>. Acesso em 20 de mar. 2022.

MERITOR WABCO. **RSSplus™ Trailer ABS with Roll Stability Support**.USA, 2012. Disponível em:< <https://trinitytrailer.com/wp-content/uploads/2018/08/ROLL-STABILITY-MAINTENANCE-MANUAL.pdf>>. Acesso em 4 set. 2022.

MUELLER T.H., ET AL. **Heavy Vehicles Stability Versus Crash Rates. Transporte Engineering Reseach New Zealand Limited**. 1999. Disponível em < <https://www.ternz.co.nz/Publications/Heavy%20Vehicle%20Stability%20Versus%20Crash%20Rates.pdf> >. Acesso em 27 mar. 2022.

PAINEL CNT de Acidentes Rodoviários - Principais dados - 2021. Confederação Nacional do transporte. [S.I].2021. Disponível em:< <https://www.cnt.org.br/pesquisas>>. Acesso em 15 mar. 2022.

PORTAL guia do TRC. **Pesos e dimensões máximas permitidas das principais configurações de veículos usadas no Brasil**. Brasil, 2015. Disponível em:< <http://www.guiadotrc.com.br/lei/qresumo.asp>>. Acesso em 19 jun. 2022.

RELAÇÃO entre o transporte rodoviário de carga e PIB pode chegar a 29%, segundo cálculos da FGV. Federação Getúlio Vargas. [S.I]. 2020. Disponível em: <<https://portal.fgv.br/noticias/relacao-entre-transporte-rodoviario-carga-e-pib-pode-chegar-29-segundo-calculos-fgv>>. Acesso em 13 mar. 2022.

RELATÓRIO da frota circulante. Sindipeças. São Paulo. 2021. Disponível em: <<https://www.sindipeças.org.br/area-atuacao/?co=s&a=frota-circulante>>. Acesso em 13 mar. 2022.

SEJA bem-vindo ao Centro tecnológico Randon. Farroupilha ,2022. Disponível em: < <https://ctr.randon.com.br/pt/sobre/> >. Acesso em 29 de abr. 2022.

VIAPIANA, César. **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, 2020.

WINKLER, C. B. **Rollover of heavy comercial vehicles**. UMTRI Research Review, AnnArbour, Michigan, v.31,n.4, 2000. Disponível em : <
https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/110910/rr31_4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 27 mar. 2022.

WABCO. **Descrição do sistema - TEBS E versões TEBS EO a E4**, 2017. Disponível em :<
<https://www.wabco-customercentre.com/catalog/docs/8151300933.pdf>>. Acesso em 04 set. 2022.

KNORR BREMSE. **Product Manual - Trailer EBS**. Disponível em :<
[https://www.kelberg.com/downloads/y037243_en_004_2009-11-26\[1\].pdf](https://www.kelberg.com/downloads/y037243_en_004_2009-11-26[1].pdf)>. Acesso em 19 jun. 2022.

12 METAS para um trânsito seguro. Organização das Nações Unidas – ONU . Observatório Nacional de segurança viária. São Paulo, 2019. Disponível em: < <https://www.onsv.org.br/12-metas-para-um-transito-seguro-organizacao-das-nacoes-unidas-onu/>>. Acesso em 27 mar. 2022.