

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Diretoria de Educação Aberta e à Distância

Licenciatura em Matemática

Edmar Fernandes

APLICAÇÃO MATEMÁTICA NA PREVENÇÃO DE TOMBAMENTOS

ITAMARANDIBA

2023

Edmar Fernandes

APLICAÇÃO MATEMÁTICA NA PREVENÇÃO DE TOMBAMENTOS

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em matemática da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Matemática.

Orientador (a): Mr^a. Wanessa Lima de Oliveira

Coorientador (a): Eduarda Ferreira de Oliveira

Itamarandiba

2023

Edmar Fernandes

APLICAÇÃO MATEMÁTICA NA PREVENÇÃO DE TOMBAMENTOS

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Matemática da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Matemática.

Orientador: Mr^a. Wanessa Lima de Oliveira
Coorientador(a): Eduarda Ferreira de Oliveira

Data da aprovação /____/ _____

Eduardo Gomes Fernandes
Diretoria de Educação Aberta e à Distância - UFVJM

Frederico Ramos Fioravante
Faculdade de Ciências Exatas - UFVJM

Wanessa Lima de Oliveira
Diretoria de Educação Aberta e à Distância - UFVJM

Itamarandiba, 2023

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder saúde e tranquilidade para superar os obstáculos durante a realização desse trabalho;

A minha família, sobretudo minha esposa, por me apoiar e compreender minha ausência durante a execução do trabalho;

Aos meus orientadores, pelo suporte, incentivo e motivação;

Ao departamento de licenciatura em Matemática da UFVJM, todos os professores e demais servidores que contribuíram diretamente e indiretamente durante o curso e para a realização desse trabalho.

RESUMO

O presente trabalho busca analisar o uso de cálculos matemáticos e os conceitos de física que auxiliem na prevenção de acidentes de trânsito, com foco no tombamento de veículos de carga, perguntas como, por que caminhões tombam? Qual a área de varredura para veículos de diferentes tamanhos? Essas e várias outras perguntas podem ser respondidas com cálculos matemáticos que podem solucionar problemas e auxiliar no desenvolvimento de tecnologias que possam evitar prejuízos financeiros e, principalmente, evitar acidentes e salvar vidas. Ao final do trabalho poderá ser apreendido diversas formas de contribuição da matemática na prevenção de acidentes de trânsito e como esses modelos poderão contribuir para o resultado dessa pesquisa. Para alcançar o objetivo de um resultado satisfatório, será utilizada a revisão literária, através da metodologia de revisão integrativa, com uma análise criteriosa da literatura, investigando os trabalhos pertinentes para a realização da pesquisa. Como resultado da pesquisa espera-se que seja elaborada uma cartilha educativa que oriente condutores de como exercer uma condução eficiente e segura, proporcionando um conhecimento básico que auxilie em uma condução econômica e ajude a evitar acidentes através do conhecimento das forças que atuam sobre os veículos e os impactos que elas causam.

Palavras-chave: Tombamento, Trânsito, Matemática, Física.

ABSTRACT

The present work project that aims to analyze the use of mathematical calculations and physics concepts that assist in the prevention of traffic accidents with a focus on cargo vehicles, questions such as, why do trucks overturn? What is the scanning area for vehicles of different sizes? These and several other questions can be answered with mathematical calculations that can solve problems and help in the development of technologies that can avoid financial losses and, mainly, avoid accidents and save lives. At the end of the work, we will be able to perceive different forms of contribution of mathematics in the prevention of traffic accidents and how these models can contribute to the result of this research. In order to reach the objective of a satisfactory result of the research project, a literary review will be used, through the integrative review methodology, with a careful analysis of the literature, investigating the relevant works for the accomplishment of the work. As a result of the research, an educational booklet is expected to guide drivers on how to drive efficiently and safely, providing basic knowledge that helps in economical driving and helps to avoid accidents through knowledge of the forces that act on vehicles. and the impacts they cause.

Keywords: Rollover, SRT, Traffic. Mathematics, Physics.

LISTA DE FIGURAS

Fig 1- Daimler, primeiro veículo de carga do mundo.....	11
Fig 2- Ford modelo TT.....	12
Fig 3- Surgimento do semirreboque.....	12
Fig 4- Modelo de caminhão tri articulado “tri trem”.....	13
Fig 5- Ilustração do offtracking de um veículo.....	15
Fig 6- Ilustração simplificada da área de varredura de veículo trator e semirreboque.....	15
Fig 7- Forças que atuam sobre um veículo em curva horizontal.....	21
Fig 8- Efeitos de LCVs em relação a CO ₂ , óleo diesel, custos de.....	24
Fig 9- Tombamento resultante do fenômeno da amplificação traseira.....	27
Fig 10- Diagrama Razão de Transferência de Carga Dinâmica.....	29
Fig 11- Diagrama de um veículo rígido em movimento curvilíneo e pista plana.....	30
Fig 12- Diagrama de um veículo rígido em pista inclinada e movimento.....	32
Curvilíneo.	
Fig 13- Gráfico da equação da estabilidade de um veículo em pista inclinada.....	33
Fig 14- Diagrama de um veículo com suspensão em pista plana e movimento	
Curvilíneo.....	34
Fig 15- Ensaio para determinação de parâmetros de estabilidade.....	41
Fig 16- Plataforma “Tilt Table”, ensaio para verificação de SRT.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 JUSTIFICATIVA.....	9
3 OBJETIVOS.....	10
3.1 Objetivo Geral.....	10
3.2 Objetivos específicos.....	10
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
4.1 Análise da evolução dos veículos de carga.....	11
4.2 A influência dos parâmetros geométricos da rodovia na gravidade e prevenção dos acidentes.....	14
4.3 Estatística aplicada a prevenção de acidentes.....	17
4.4 Modelagem matemática a serviço da prevenção de acidentes.....	18
4.5 Matemática e conceitos de física no auxílio à condução.....	19
4.6 Matemática em função da prevenção de tombamentos.....	20
5 METODOLOGIA	22
6 CARACTERÍSTICAS DO CVC E COMO SÃO ABORDADOS EM OUTROS PAÍSES.....	23
6.1 Parâmetros para a avaliação de desempenho e segurança.....	25
6.2 Amplificação traseira.....	27
6.3 Razão de transferência de carga dinâmica.....	28

6.4 Limiar de tombamento estático.....	29
7 CARTILHA PARA CONDUTORES DE CAMINHÕES.....	35
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
9 REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

A educação matemática está presente desde a antiguidade, ela surgiu com o objetivo de solucionar necessidades básicas da sociedade naquele período, como medição e contagem. Assim os conhecimentos matemáticos vêm se desenvolvendo com a civilização, buscando encontrar soluções para os problemas do dia a dia, dessa forma ela está presente nos processos de evolução e mudança da sociedade. (D'AMBRÓSIO; 1986).

Mesmo com toda essa importância, o ensino da matemática é considerado complexo e desafiador, o conteúdo, muitas vezes abstrato, encontra diversas barreiras entre os alunos e até mesmo na sociedade. Assim faz-se necessário estudos que tenham como objetivo utilizar a aplicação prática da matemática como solução de problemas do cotidiano. Esse é um desafio de professores e pesquisadores, mas é de fundamental importância para o progresso do conteúdo matemático, além de aproximá-lo das necessidades da sociedade contribuindo de forma positiva da maneira como este conteúdo é visto. Esse pensamento vai ao encontro do que disse Conceição:

As demandas impostas pela sociedade atual contribuem para o aumento da necessidade do conhecimento matemático. Contudo, a maneira como vem sendo transmitido diminui o interesse do aluno por seu conhecimento aprofundado. Assim, ele perde a ideia do que realmente é a Matemática quando não se valoriza a sua presença associada a situações diversas do seu cotidiano. (CONCEIÇÃO, 2016, p.95).

Um exemplo desse exercício de correlação com o cotidiano seria a aplicação de cálculos matemáticos na prevenção de acidentes de trânsito. De acordo com a Confederação Nacional de Trânsito (CNT), através de seu painel de consultas dinâmicas dos acidentes rodoviários, em 2021, ocorreram 64.452 acidentes nas rodovias brasileiras, sendo que dentre esses 52.762 com vítimas, ainda segundo o painel da CNT, somente em 2021 foram 5.391 vidas perdidas, dessa forma a cada 100 acidentes com vítima 10 pessoas morreram. (Confederação Nacional de Trânsito. (CNTN; 2022).

Segundo o levantamento da Confederação Nacional de Transporte, 27,6 % dos acidentes com vítimas são decorrentes de saídas de pista e tombamento. Em se tratando de veículos de carga, esses têm maior potencial de fatalidade, maior até quando comparado a colisão frontal. Além disso, os acidentes ainda causam um enorme prejuízo financeiro, que somente em 2021 alcançou o valor de R\$ 12,19 bilhões de reais. (CNTN; 2022).

Segundo Dr. Rubens Penteado de Melo (2010), especialista em prevenção de acidentes de trânsito, fenômenos como tombamento podem ser explicados e prevenidos através de cálculos matemáticos e conceitos de física. Ao assistir fórmula 1, é possível ouvir sobre uma “força g” que nessa categoria, nas curvas, chega a atingir “5 g’s”. Essa “força g” é a aceleração lateral em curva ou em uma manobra, que é medida na unidade da aceleração da gravidade em que

$$(g = 9,8 \text{ m/s}^2)$$

Então de uma forma simples é essa “força” que empurra o condutor contra a porta do veículo durante uma curva. É também essa aceleração lateral que causa o tombamento de um veículo de grande porte, assim enquanto um veículo de fórmula 1 pode suportar até 5 g’s, a maioria dos caminhões tombam entre 0,4 e 0,6 g’s. (MELO; 2010).

Nesse trabalho, será abordada a medida básica para a avaliação da estabilidade lateral dos veículos o chamado Limiar de Tombamento Lateral Estático, SRT, (*Static Rollover threshold*) e outras forças que atuam sobre os veículos, de forma que os condutores tenham o conhecimento necessário para uma atuação preditiva e não reativa, conhecendo e entendendo a mecânica envolvida no tombamento e evitando situações de risco. A pesquisa busca compreender a causa dos tombamentos de veículos, além de entender como é feito o cálculo da área de varredura de veículos de carga de grande porte para a abertura de uma curva, que faz surgir vários questionamentos para o campo da matemática, visto que isso muitas vezes é ignorado comprometendo a segurança de pessoas que utilizam as rodovias. A evolução desses cálculos e o estudo das forças que atuam sobre os veículos é o ponto de partida para o desenvolvimento de instrumentos que têm como objetivo tornar a condução dos veículos de carga mais eficiente e segura.

Dessa maneira, esse trabalho através de uma pesquisa bibliográfica, busca discorrer sobre a aplicação matemática no estudo e prevenção de acidentes de trânsito e criar uma cartilha educativa que demonstre essa aplicação de maneira clara, de fácil entendimento com informações necessárias para auxiliar os condutores de veículos pesados, sobre as forças que interferem tanto de forma positiva quanto negativa na condução de seus veículos de carga, para que não dependam apenas da experiência prática e também possa servir de base, junto com outros estudos, para o desenvolvimento de ferramentas de segurança que auxiliem esses condutores, como rotogramas e assistentes de condução virtual, como aplicativos de trânsito e navegação que tenham rotas

calculadas levando em consideração a especificidade de veículos de carga e limites de velocidade em curva baseados em cálculos matemáticos.

2 JUSTIFICATIVA

A pesquisa se justifica também na medida em que o número de acidentes de trânsito vem aumentando no Brasil, assim como a gravidade desses acidentes, somente em 2021, dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT), indicam que houve 63.447 ocorrências, dessa forma 5.391 vidas foram perdidas nas estradas brasileiras e desses 15,9 % ocupavam caminhões. Os números são da Polícia Rodoviária Federal e estão compilados no painel da CNT. Dessa maneira, a proposta desse trabalho seria uma ótima alternativa para o desenvolvimento de instrumentos e tecnologias que busquem auxiliar na redução de ocorrências no trânsito.

O interesse no tema surge a partir da necessidade encontrada no dia a dia de gestores de frota e profissionais de logística que convivem frequentemente com tombamentos de veículos de grande porte. Os questionamentos durante a análise dessas ocorrências motivaram esse trabalho, para a execução segura e eficaz da operação, faz se necessário a criação e utilização de ferramentas que colaborem para a segurança dos condutores, na gestão moderna de frotas não cabe mais ter a expertise e experiência do condutor como únicas ferramentas de segurança, assim surge a necessidade de alternativas que auxiliem esse condutor, como ferramentas tecnológicas, desenhos de rota (rotograma) e conhecimento das forças que atuam tanto positivamente quanto negativamente na condução do veículo, todavia a velocidade ideal de deslocamento em curvas, as quais serão utilizadas nessas ferramentas, não deve ser obtida através de “achismo”, mas sim a partir de cálculos matemáticos apropriados.

A cartilha, que será produto dessa pesquisa, busca auxiliar os condutores a conhecerem as forças que atuam sobre os veículos e de que forma elas impactam a condução, trazendo informações necessárias para que eles conheçam a matemática por trás do que sentem na prática quando estão conduzindo seus veículos. Essa cartilha tem como objetivo, fornecer os cálculos necessários também para gestores de frota, para que possam fazer a análise prévia das vias e construir um rotograma com a velocidade ideal de tráfego a partir dos cálculos do limiar de tombamento e também conhecimento necessário para abertura de curvas que atendam aos modelos de veículos mais longos, o que é chamado no Brasil de área de arraste (*offtracking*).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral utilizar conceitos matemáticos e físicos na prevenção de acidentes de trânsito com veículos de grande porte.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar um estudo sobre a relação da matemática e o trânsito;
- Descrever os principais cálculos matemáticos e físicos que podem ser utilizados na prevenção de acidentes de veículos de grande porte;
- Utilizar os conhecimentos matemáticos para o desenvolvimento e aprimoramento de instrumentos de prevenção de acidentes de veículos de carga.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

A forma dos meios de transporte no mundo está em constante evolução, sobretudo os veículos de carga, assim também no Brasil, a necessidade de transportar volumes cada dia maiores mudou substancialmente a característica dos veículos de carga, segundo o Dr. Rubem Penteado de Melo, essa mudança se deu principalmente depois de entrar em vigor as resoluções 210 e 211/2006 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito), que autorizou a circulação de um novo modelo de veículo, o CVC (Combinação de Veículo de Carga).

O crescimento desse modelo de veículo se deu muito rapidamente, graças a sua grande capacidade de carga, assim surgiram no Brasil veículos que já rodavam em outros países, como Estados Unidos e Austrália, bitrens, tritrens e rodotrens.

Tratando-se de rodovias, a segurança é o quesito mais importante. Para a compreensão do impacto da evolução dos veículos de carga na segurança das vias faz-se necessário que conhecer, esse desenvolvimento ao longo dos anos.

4.1. Análise da evolução dos veículos de carga

O que se chamou de primeiro veículo de carga do mundo foi o veículo construído pela alemã Daimler, em 1896, o veículo era uma carroça, todavia, equipada com um motor de combustão interna de 4 cv de potência, que podia funcionar com 3 diferentes tipos de combustível, gasolina, gás e querosene de lamparina, conforme mostra a figura 1.

Figura 1: Daimler, primeiro veículo de carga do mundo.



Fonte: O estadão (2021)

Já em 1917, exatamente no dia 27 de julho, a Ford apresentou seu primeiro caminhão, modelo TT, alterando chassi, suspensão e caixa, preparando o veículo para transporte de carga, o veículo foi desenvolvido visando atender aos fazendeiros, todavia foi amplamente usado durante a primeira guerra.

Figura 2: Ford modelo TT



Fonte: Universo motor (2018)

No início dos anos 1900 surgiu uma ideia que viria a revolucionar o transporte de carga no mundo, o surgimento dos semirreboques. Os primeiros modelos que se tem notícias data-se de 1914 em Detroit nos Estados Unidos, criado pelo marceneiro e ferreiro August Charles Fruehauf, como o surgimento do semirreboque surge também o que ficaria conhecido como cavalo mecânico.

Figura 3: Surgimento do semirreboque



Fonte: Planeta Caminhão (2022)

Nos últimos 127 anos, desde 1886, os veículos de carga evoluíram significativamente, mudando a configuração da frota de veículos mundial, sobretudo no Brasil que tem uma extensa malha rodoviária, além disso, segundo a Fundação Dom Cabral, aproximadamente 75% do escoamento das mercadorias são feitas pelo modal rodoviário. A partir dessa evolução surgiram os chamados “veículos articulados” que é composto por um veículo de tração motorizado e um que é rebocado, que é chamado de reboque e semirreboque, que no Brasil ficou conhecido como carreta.

Figura 4: Modelo de caminhão tri articulado “tri trem”



Fonte: autor (2023)

Conhecendo um pouco da evolução dos veículos de carga, percebemos que evoluíram não só em tecnologia, mas também em tamanho, potência e quantidade, tornando as rodovias cada dia mais perigosas, por consequência exigindo um esforço cada vez maior no desenvolvimento de ferramentas que auxiliem os usuários em uma condução segura. Nesse sentido a matemática é uma aliada com enorme potencial, na medida em que várias ferramentas surgiram e podem surgir a partir de conceitos e modelos matemáticos. A seguir serão apresentadas algumas aplicações matemáticas na prevenção de acidentes de trânsito.

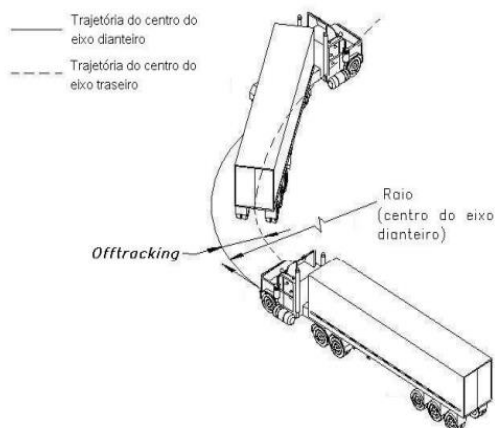
4.2 A influência dos parâmetros geométricos da rodovia na gravidade e prevenção de acidentes

Devido à evolução dos veículos e o aumento constante do VMD (volume médio diário) que é o volume de tráfego de uma rodovia, trecho ou seção dessa, faz-se necessário que a estrutura das rodovias acompanhe essa evolução. Assim a geometria é um ramo da matemática que permeia o projeto rodoviário desde seu início, dada essa grande importância, o Departamento Nacional de Estradas e Rodagens tem um manual de projeto geométrico que orienta e traz regras para construção de rodovias. Por exemplo na página 43 o manual aborda a importância das características dos veículos no projeto da rodovia. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (1999, p.43) cita que:

- A largura do veículo influencia a largura da pista de rolamento, do acostamento e dos ramos;
- A distância entre eixos influi no cálculo da superlargura das pistas principais e na determinação da largura e dos raios mínimos internos das pistas dos ramos; - O comprimento do veículo influencia a largura dos canteiros, a extensão de faixas de espera, a capacidade da rodovia e as dimensões de estacionamento;
- A relação peso bruto total/potência relaciona-se com o valor da rampa máxima admissível, participa na determinação da necessidade de faixa adicional de subida (terceira faixa) e, para efeito de capacidade, na equivalência em unidades de carros de passeio;
- O peso bruto admissível dos veículos, conjugado com a configuração dos eixos e a posição do centro de gravidade, influi no dimensionamento e configuração do pavimento, de separadores rígidos e defensas;
- A altura admissível para os veículos condiciona o gabarito vertical sob redes áreas e viadutos, túneis, sinalização vertical e semáforos;

A figura 5 a seguir traz um exemplo prático da aplicação da matemática através do projeto geométrico é o cálculo da trajetória dos veículos articulados, o *offtracking* ou arraste.

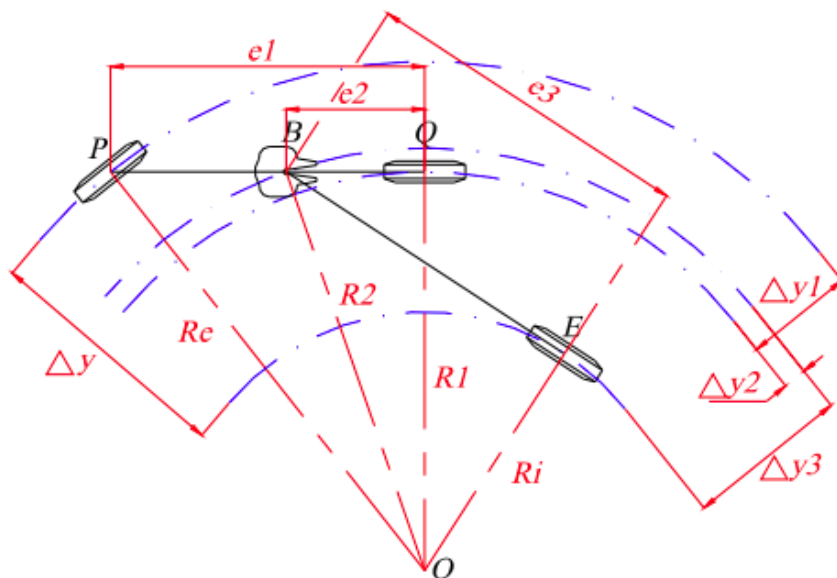
Figura 5: Ilustração do *offtracking* de um veículo



Fonte: Melo (2018, p.163)

Derivada do *offtracking*, a chamada “área de varredura” deve ser calculada na abertura de curvas levando em consideração o tipo e comprimento do veículo além do grau de curvatura, essa medida, quando adequada evita que o veículo saia da área de rolamento da pista podendo até mesmo atingir o talude da via e ocasionar o tombamento.

Figura 6: Ilustração simplificada da área de varredura de veículo trator e semirreboque.



Fonte: Melo (2018, p. 168)

Na figura 6, temos o diagrama que explica o *offtracking* (Δy) que é variação dada pela equação:

$$\Delta y = Re - Ri$$

Da figura 6, observa-se que:

$$\Delta y = \Delta y1 - \Delta y2 + \Delta y3 \quad (1)$$

Onde:

$$\Delta y1 = Re - R1 \quad (2)$$

Do triângulo retângulo OPQ tem-se:

$$R1 = \sqrt{Re^2 - e1^2} \quad (3)$$

Ao substituir (3) em (2) tem-se:

$$\Delta y1 = Re - \sqrt{Re^2 - e1^2} \quad (4)$$

$$\Delta y2 = R2 - R1 \quad (5)$$

Do triângulo retângulo OBQ tem-se:

$$R2 = \sqrt{R1^2 + e2^2} \quad (6)$$

Agora substituindo (3) em (6) em seguida em (5) tem-se que:

$$\Delta y2 = \sqrt{Re^2 - e1^2 + e2^2} - \sqrt{Re^2 - e1^2} \quad (7)$$

$$\Delta y3 = R2 - Ri \quad (8)$$

Já do triângulo OBE tem-se que:

$$Ri = \sqrt{R2^2 - e3^2} \quad (9)$$

Dessa forma:

$$\Delta y3 = \sqrt{R1^2 + e2^2} - \sqrt{R2^2 - e3^2} \quad (10)$$

Substituindo os valores de R2 e R3 em (10) tem-se que:

$$\Delta y_3 = \sqrt{Re^2 - e1^2 + e2^2} - \sqrt{Re^2 - e1^2 + e2^2 - e3^2} \quad (11)$$

Substituindo (4), (7) e (10) em (1) temos que:

$$\Delta y = Re - \sqrt{Re^2 - e1^2} - \sqrt{Re^2 - e1^2 + e2^2} + \sqrt{Re^2 - e1^2 + \sqrt{Re^2 - e1^2 + e2^2} - \sqrt{Re^2 - e1^2 + e2^2 - e3^2}} \quad (12)$$

Finalmente, simplificando a equação (12), tem-se o valor do *Offtracking* (Δy) para esse conjunto:

$$\Delta y = Re - \sqrt{Re^2 - e1^2 + e2^2 - e3^2}$$

Esse cálculo é fundamental tanto na construção de novas rodovias quanto na modernização das antigas, já que a maioria das vias foram construídas antes do surgimento dos modelos de veículos mais longos. (Mello 2018).

Dessa forma o projeto geométrico de uma rodovia desempenha um papel fundamental na prevenção de acidentes, na medida em que está diretamente ligado à segurança e às condições de desempenho da via, visto que é através dele que são estabelecidos os parâmetros para o traçado, a largura da via, o perfil do terreno, a sinalização e vários outros aspectos que influenciam diretamente na segurança dos usuários da via. Um projeto geométrico bem elaborado tem o potencial de reduzir significativamente os riscos de acidentes nas vias tanto por redução da velocidade ou melhoria da visibilidade como também na distribuição do tráfego além de várias outras formas (Said M. Easa. 2003. pag 30).

4.3 Estatística aplicada a prevenção de acidentes

Diversos segmentos utilizam a estatística como ferramenta para a obtenção e interpretação de dados e para compreender o objeto de estudo. A estatística pode ser utilizada no auxílio de estudos que envolvem tratamento de vidas e comportamentos humanos. Dessa forma a estatística não deve ser vista meramente como leitura de dados dispostos em gráficos e tabelas,

sendo necessárias atividades específicas de investigação, como formulação de questões, levantamento de hipóteses, representatividade, margem de segurança, além de confrontação de resultados. (MORETTIN; SINGER; 2019).

Ainda segundo Morettin e Singer (2021), a análise de dados amostrais possibilita que se faça inferência sobre a distribuição de probabilidades das variáveis de interesse, definidas sobre a população da qual a amostra foi (ao menos conceitualmente) colhida. Nesse contexto, a Estatística é uma ferramenta importante para organizá-los, resumi-los, analisá-los e utilizá-los para tomada de decisões. A análise estatística com o objetivo de estudo e prevenção de acidentes de trânsito deve levar em consideração fatores comportamentais, mecânicos e geográficos, tendo grande importância a análise comportamental. No entanto, segundo Bartlett, Maurice Stevenson (1937), “uma concepção estatística de fatores mentais não invalida necessariamente a busca de fatores aos quais um certo grau de realidade pode ser atribuído de maneira útil”.

Dessa forma a estatística contribui com a prevenção de acidentes de diversas formas, de acordo com Piovezan (1991), como na análise de causa, que podem ser causas remotas, como influência do ambiente social e da hereditariedade, ou causas pessoais, por exemplo o desconhecimento das normas de segurança, dos desajustamentos, da saúde dos estados psicológicos, físicos e também causas imediatas como atos e condições inseguras.

Ainda segundo Piovezan (1991), para que seja eficiente, a análise estatística deve atender às necessidades do agente que utilizará a pesquisa: para o educador por exemplo a pesquisa deve indicar os principais atos inseguros cometidos por condutores e pedestres, para que possa direcionar o programa de treinamento, para o policial a pesquisa deve demonstrar as infrações que mais causam incidentes, quando e onde elas ocorrem, aos engenheiros de trânsito a pesquisa deve apontar os locais onde os acidentes ocorrem por falhas em projetos ou alterações das condições dos locais, assim como aos fabricantes de veículos deve fornecer as falhas mais comuns e o comportamento dos veículos nos acidentes.

4.4 Modelagem Matemática a serviço da previsão de acidentes

A modelagem também pode ser utilizada com o objetivo de prevenção de acidentes, assim essas ocorrências podem ser previstas através de modelos matemáticos, generalizando, eles determinam o valor possível de uma taxa de ocorrência em função de determinados variáveis com valor

significativo para que ocorra o acidente. Essa ferramenta tende a oferecer um valor esperado de acidentes em um local específico, dentro de um período determinado, por exemplo Brüde e Larsson (1993), assim como Gilmar Cardoso e Lenise Grando Goldner (2007), criaram na Suíça um modelo para previsão de acidentes em interseções, para ocorrências com participação de pedestres e ciclistas, utilizando dados de interseções de 30 cidades.

No trabalho de Gilmar Cardoso e Lenise Grando Goldner (2007) foram analisadas 285 interseções com o objetivo de formular o modelo de previsão para acidentes envolvendo pedestres, e 377 interseções para formular o modelo de previsão com o envolvimento de ciclistas. A escolha das interseções é de grande importância para o resultado do trabalho, como disseram Gilmar Cardoso e Lenise Grando Goldner (2007):

As interseções variavam quanto ao tipo: interseções não semaforizadas, interseções semaforizadas e rotatórias. O trabalho usou como técnica estatística o método dos mínimos quadrados, definindo a taxa de acidentes como variável dependente. (CARDOSO; GOLDNER, 2007, p. 5)

Rik Timmerman (2022), também contribuiu para a segurança no trânsito com um modelo que tinha como objetivo acabar com os engarrafamentos nos semáforos e melhorar o fluxo de tráfego, o fato de dirigir em congestionamento é bastante complicado e cansativo, sobretudo veículos de grande porte. Nesse sentido o autor pesquisou como tentar acabar com os congestionamentos através da matemática. Muitas são as variáveis que interferem no fluxo em um semáforo, como quantidade de veículos, fatores climáticos e comportamentais. “Mas o acaso também desempenha um papel, às vezes há dos carros em um semáforo, outras vezes dez, e se um idoso atravessa ao mesmo tempo, isso também afeta”. (TIMMERMAN (2022).

Ele tentou considerar todas essas variáveis em um modelo de filas do tipo *Fixed-cycle traffic-light* (FCTL), buscando encontrar um padrão no caos do trânsito para fornecer um fluxo mais eficiente.

4.5 Matemática e conceitos de Física no auxílio à condução

A matemática aliada à física também pode ser utilizada no treinamento de motorista visando uma condução segura e econômica. Com a evolução dos veículos é cada vez mais importante que os condutores também acompanhem essa evolução, assim faz se necessário que eles tenham no mínimo noção de conceitos como aerodinâmica, resistência ao ar, resistência ao

rolamento, além de inércia e força da gravidade, que têm grande impacto no custo e sustentabilidade da operação de transporte. Nesse sentido Luiz A. Pigozzo (2015) descreve,

Inércia é a tendência que os corpos apresentam para resistirem às mudanças do movimento em que se encontram. Ou seja, se o caminhão estiver parado, precisamos de uma força extra para tirá-lo da posição parado. Quando ele entra em movimento em uma velocidade constante, ela (inércia) se torna nula. E todas as vezes que precisamos fazer uma mudança de velocidade, teremos que vencer a força da inércia, para reduzir ou aumentar a velocidade. (PIGOZZO; 2015).

Neste contexto, todas as vezes que o motorista realiza trocas de marcha ele faz com que a força necessária para vencer a inércia atue, exigindo maior torque do motor para a retomada e aumento da velocidade, causando assim maior consumo de combustível, dessa forma faz-se necessário que ele tenha conhecimento desses conceitos para evitar trocas desnecessárias tornando sua condução mais econômica e eficiente. (PIGOZZO; 2015).

4.6 Matemática em função da prevenção de Tombamentos

Com a evolução da tecnologia, os veículos de grande porte estão cada vez mais potentes e com vários recursos. Todavia, o que é um avanço no que se refere ao tempo de viagem, economia, conforto, também pode ser um grande risco, na medida em que os condutores na sua grande maioria não estão preparados para utilizar toda a tecnologia disponível a seu favor. Aliado a isso, grande parte das rodovias brasileiras contam com estrutura e sinalização da época da pavimentação, anos 60, 70 e 80, dessa forma a sinalização satisfaz a necessidade dos veículos da mesma época, sendo assim ineficiente para os veículos modernos, sobretudo devido ao tamanho dos veículos que estão cada vez maiores.

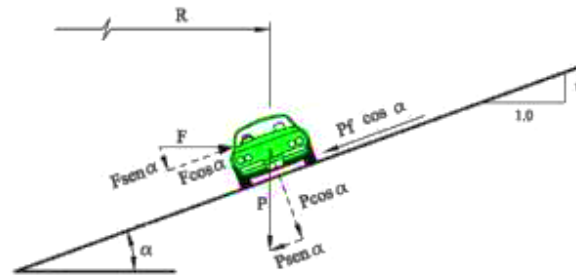
O uso da matemática aplicada à prevenção de tombamentos vem ao encontro da necessidade do gestor de frotas não depender apenas da experiência prática do condutor do veículo, mas de ter a possibilidade do desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie o condutor em uma condução segura e eficiente. Grande parte dos tombamentos laterais ocorrem por falha operacional, devido à imperícia, imprudência e falta de

conhecimento da via. Dessa forma faz-se necessário que os motoristas tenham conhecimento das forças que impactam diretamente sua condução, como amplificação traseira, que é típico de veículos com número maior de articulações e ocorre quando há o aumento do deslocamento lateral do último conjunto quando comparado ao deslocamento lateral da primeira composição, como também o efeito chicote que é consequência da amplificação traseira e ocorre geralmente quando há mudanças bruscas de direção ou oscilações causadas por desníveis na via, e também o centro de gravidade que é o ponto do veículo onde todo o peso parece se concentrar e está diretamente ligado à estabilidade do caminhão, todavia a educação do condutor não é suficiente por si só, é necessário que se desenvolvam ferramentas que auxiliem o motorista nas tomadas de decisão. Para o desenvolvimento dessas ferramentas é preciso conhecer as forças que atuam sobre o veículo. (Rubem Penteado; 2010)

Gillespie (1992), define tombamento como, “qualquer manobra no qual o veículo rotaciona 90° sobre seu eixo longitudinal na qual o mesmo perde seu contato com o piso”. Assim, segundo o entendimento da física do tombamento envolve o estudo da dinâmica dos veículos, e do balanço de forças usando modelos de diversas complexidades

A Figura 7 apresenta as forças que atuam sobre os veículos em curva horizontal e que têm grande influência na condução dos veículos.

Figura 7: Forças que atuam sobre um veículo em curva horizontal



- 1- Velocidade Ótima: $F \cos \alpha = P \sin \alpha$
 2- Velocidade Superior à Velocidade Ótima: $F \cos \alpha > P \sin \alpha$
 3- Velocidade Inferior à Velocidade Ótima: $F \cos \alpha < P \sin \alpha$

Legenda:

P = peso do veículo (N)
 m = massa do veículo (kg)
 g = aceleração da gravidade terrestre (m/s^2)
 v = velocidade do veículo (m/s)
 $\frac{v^2}{R}$ = aceleração centrífuga (m/s^2)
 α = ângulo que mede a declividade transversal da pista
 F = força centrífuga (N)
 R = raio de curvatura (m)
 $e = \tan \alpha$ = superelevação (m/m)
 f = coeficiente de atrito transversal

Fonte: DNIT (2005, p. 64)

Na análise de acidentes deve-se estar atento ao tipo de veículo e também da carga transportada, ambos têm grande influência em ocorrências de acidentes. Nesse sentido o Dr. Rubem Penteado de Melo (2018), defende a regra 80/20, que explica teoricamente o que é sentido na prática e causa grande número de acidentes nas rodovias brasileiras, segundo ele não é aconselhável transitar em rodovias com veículos tanque com carga líquida ou gases liquefeitos com volume entre 20% e 80% da carga, visto que nesse intervalo o veículo teria grande quantidade de massa e também grande quantidade de espaço para deslocamento lateral dessa carga, para transporte de cargas líquidas em tanques. Mesmo não havendo uma proibição na legislação brasileira, não é indicado o tráfego desses veículos com menos de 80% da capacidade devido ao comportamento dessa carga.

5 METODOLOGIA

Partindo destas possibilidades, em que a matemática está diretamente ligada à prevenção de acidentes e à condução eficiente dos veículos, esse trabalho trata, sobre tudo, uma parte muito importante e pouco utilizada na prevenção de acidentes com veículos de grande porte, os cálculos dos limites do tombamento e de áreas de varredura.

Desta forma, o trabalho será desenvolvido utilizando a revisão bibliográfica, visto que essa nos permite um amplo alcance de informações, buscando localizar e consultar nas mais diversas fontes de informações pertinentes ao tema, sempre circulando em volta do problema que pretendemos auxiliar na resolução através desse estudo. A eficiência da revisão bibliográfica está diretamente ligada à leitura, dessa forma Lima e Miotto destacam: “[...], pois é através dela que se pode identificar as informações e os dados contidos no material selecionado, bem como verificar as relações existentes entre elas de modo a analisar a sua consistência”. (LIMA; MIOTTO, 2007, p.41).

Assim sendo, a revisão bibliográfica melhor se aplica à proposta do trabalho, na medida em que ele será desenvolvido a partir de uma leitura crítica e uma síntese criteriosa dos materiais disponíveis.

Após a realização da revisão bibliográfica e de posse dos dados acima mencionados, será realizado a confecção de uma cartilha educativa com instruções sobre prevenção de tombamentos e dicas de condução eficiente de veículos pesados.

6 CARACTERÍSTICAS DO CVC E COMO SÃO ABORDADOS EM OUTROS PAÍSES

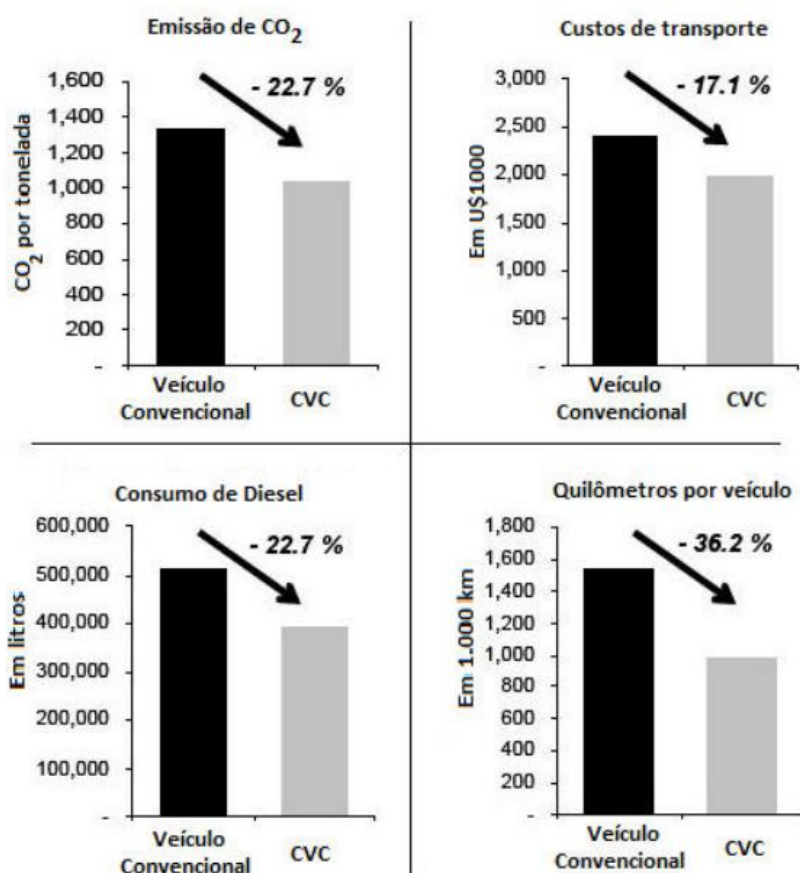
O CVC (Combinação de Veículo de Carga), é utilizado como opção para redução de custos e do número de veículos nas rodovias, em diversos países, como Estados Unidos, Austrália, Canadá, na maioria desses países o ele surge como solução durante crises, como a crise do petróleo que afetou grande parte do mundo e forçou países como Estados Unidos a evoluírem na legislação sobre utilização desses veículos entre os anos 80 e 90, como relata (EICHER, citado por REIS, 1989, p. 27). Desde então vários estudos foram realizados e em consequência a utilização dos CVCs foi cada vez mais recomendadas e incentivada.

Em 2007, a UNESCAP, *economic and social comission for Asia an the Pacific*, escrito por Philipp Nagl, trouxe um estudo bastante contundente da importância da utilização da

Combinação de Veículos de Carga, da sua eficiência no escoamento da produção, redução do número de veículos nas vias, redução do consumo de combustível e por consequência redução do impacto ambiental.

Ilustrado na figura 8, esse estudo traz a perspectiva de ganhos da utilização dos CVCs na Ásia e região do Pacífico.

Fig. 8 Efeitos de LCVs em relação a CO₂, óleo diesel, custos de transporte e viagens quilômetros.



Fonte: ESCAP (2007, p. 22)

Percebe-se que esse modelo de veículo tem um potencial muito grande para fazer parte da solução de um grande problema, que países com longa extensão como o Brasil enfrentam, o escoamento de sua produção. O Modal rodoviário prevalece no transporte brasileiro, isso por diversos motivos que não são o objetivo desse trabalho, mas podemos citar como exemplo a extensa malha rodoviária, o baixo investimento em outras modalidades de transportes. Nesse sentido, O modelo CVC deve ser olhado de uma forma especial, dado suas especificidades ele exige isto, desde autorização especial para transitar (AET), treinamento diferenciado para os condutores, até um projeto geométrico especial de vias e rodovias de forma a contemplar suas especificidades.

6.1 Parâmetros para avaliação de desempenho e segurança

A escolha de critérios para avaliação de desempenho e segurança de veículos de carga se iniciou na Austrália, pela Comissão Nacional de Transporte Australiana (NTC) e pela Autoridade para o Transporte Terrestre da Nova Zelândia e considerando a similaridade, o Dr Rubem Penteado de Melo, trouxe em sua tese de doutorado, parâmetros adaptados a nossa realidade de veículos e vias, são eles:

1 Desempenho em reta - baixa velocidade (Longitudinal performance - low speed):

- Capacidade de arranque (Startability): capacidade de iniciar movimento à frente em uma rampa com inclinação específica;
- Capacidade de rampa (Gradeability): capacidade de manter movimento à frente em determinada rampa; e atingir uma velocidade mínima em uma rampa de 1%;
- Capacidade de aceleração (Acceleration capability): capacidade de acelerar a partir do repouso ou de aumentar a velocidade na estrada; Desempenho relacionado com a infra-estrutura e o pavimento;
- Carga vertical no pavimento (Pavement Vertical Loading): carga vertical máxima aceitável no pavimento;
- Carga horizontal no pavimento (Pavement Horizontal Loading): carga horizontal máxima aceitável no pavimento;
- Carga em Ponte (Bridge Loading): efeito máximo do conjunto sobre uma ponte, comparado com o veículo padrão.

2 Desempenho Direcional – baixa velocidade:

- Área de varredura a baixa velocidade (Low Speed Swept Path): máxima largura da área de varredura do conjunto durante uma curva de 90° em baixa velocidade;
- Avanço Dianteiro (Frontal Swing): máximo avanço lateral do canto dianteiro do semirreboque durante curvas; - Avanço Traseiro (Tail Swing): máximo avanço lateral do canto traseiro do semirreboque durante curvas;
- Demanda de atrito na tração (Steer Tyre Friction Demand): atrito máximo necessário entre pneu e pavimento durante manobras em baixa velocidade; Desempenho Direcional – alta velocidade:
- Razão de Transferência de Carga Dinâmica (Dynamic Load Transfer Ratio): é a medida da razão de transferência de carga de um lado para outro do veículo em movimento, submetido a manobra
- Amplificação Traseira (Rearward Amplification): é a razão entre a aceleração lateral gerada na última unidade da combinação e a aceleração lateral da unidade tratora durante as manobras;
- Limiar do tombamento estático (Static Rollover Threshold - SRT): aceleração lateral máxima que o veículo pode suportar durante uma curva constante sem sofrer tombamento;
- Varredura transiente em alta velocidade (High Speed Transient Offtracking): distância lateral do trajeto do último eixo da unidade traseira comparado com o trajeto do eixo direcional do veículo trator, durante manobras rápidas;
- Coeficiente de amortecimento rotacional (Yaw Damping Coefficient): descreve a capacidade do conjunto em estabilizar-se na pista diante de um movimento brusco no veículo-trator;
- Estabilidade direcional durante frenagens (Directional Stability Under Braking): habilidade de manter-se estável durante as frenagens. (MELO; 2018).

Dessa forma, percebe-se que a segurança e eficácia dos veículos de carga é permeado por conceitos da física e cálculos matemáticos, assim se faz necessário entender as especificidades do conjunto CVC, visto que devido suas características, como quantidade de articulações, ele está sujeito a fenômenos que afetam de forma particular e significativa a dirigibilidade e a segurança durante a condução. Nesse sentido existem três pontos que são de grande importância para a segurança dos condutores desses veículos como também de todos os usuários das vias e diretamente ligado ao tombamento lateral do conjunto e serão tema de nosso estudo.

6.2 Amplificação traseira

A amplificação traseira ou amplificação de oscilação (*rearward amplification*), ocorre quando a oscilação traseira na parte traseira de um veículo de carga pode aumentar de uma forma descontrolada ocasionando um possível desequilíbrio ou até mesmo o tombamento do Veículo. Essa ocorrência se dá devido à relação complexa que há entre a suspensão traseira a distribuição de carga e as características da via e faz-se necessário que tanto o condutor quanto o responsável pela segurança da frota tenham conhecimento. Durante o deslocamento as irregularidades na pista que causam solavancos como lombadas, depressões ou esconso podem causar uma excitação na suspensão traseira do veículo. Caso a frequência dessas oscilações estiver próxima da frequência natural da suspensão traseira, pode ocorrer a amplificação traseira. Quando ocorre a amplificação traseira, em vez de serem dissipadas, as oscilações aumentam progressivamente, o que pode causar um movimento pendular, se a amplitude dessa oscilação se tornar muito grande, o veículo pode perder o controle levando ao tombamento conforme a figura 9, a seguir, em que se pode perceber que o movimento do tombamento inicia-se de trás para frente.

Figura: 9- Tombamento resultante do fenômeno da amplificação traseira



Fonte: autor (2022)

Segundo o especialista na área de engenharia de caminhões, Mike Martin, em seu livro *Rear-End Amplification Techniques for Trucks*, a amplificação traseira é mais comum

em veículos de suspensão rígida, como feixe de molas, quando não existe a suspensão independente que faça a compensação.

6.3 Razão de transferência de carga dinâmica

Em se tratando de veículos de carga, a Razão de Transferência de Carga Dinâmica (Dynamic Load Transfer Ratio), refere-se à redistribuição de peso que ocorre durante manobras, curvas, aceleração ou desaceleração, durante essas condições dinâmicas, ocorre a transferência de peso da carga de um eixo para o outro, o que pode afetar a estabilidade do veículo. A matemática pode ajudar a entender e prever a transferência de carga dinâmica em CVCs. Por exemplo, os princípios da física, como as leis do movimento e a mecânica dos corpos rígidos, podem ser aplicados para modelar o comportamento do veículo em diferentes situações. Dessa forma os engenheiros utilizam equações e cálculos matemáticos para analisar as forças envolvidas, levando em consideração fatores essenciais como características dos veículos, centro de gravidade, geometria, suspensão e coeficiente de atrito dos pneus.

Quando Fala-se em estabilidade lateral, a razão de transferência de carga dinâmica é a medida da transferência de carga de um lado para o outro do veículo em movimento, submetido à manobras evasivas. Segundo a Agência de transportes da Nova Zelândia, para determinar esse valor é necessário submeter o veículo a uma manobra específica em velocidade e avaliar a carga transferida de um lado para outro (do lado interno da curva para o lado externo), em relação a carga total. O máximo valor dessa razão de transferência é chamado de DLTR. Esse valor do DLRT varia sempre entre 0 e 1, onde 0 significa nenhuma transferência de carga e 1 significa transferência total de carga de um lado para outro.

Baseando-se nessas análises, os engenheiros podem projetar sistemas de suspensão, chassis e pneus adequados para lidar com a transferência de carga garantindo a estabilidade do veículo. Eles também podem fornecer diretrizes e recomendações para os motoristas sobre técnicas de condução seguras, como ajustar a velocidade, evitar manobras bruscas e manter a carga adequadamente distribuída. Em seguida podemos perceber um diagrama que expressa o DRLT,

Figura 10: Diagrama Razão de Transferência de Carga Dinâmica

$$F_{zo} - F_{zi} = 2 \cdot F_y \cdot \frac{h_r}{t} + 2 \cdot \frac{K_\phi \cdot \phi}{t} = 2 \cdot \Delta F_z$$

parcela devido à aplicação da força lateral
 parcela devido à rolagem do veículo

Fonte: Barreto (2014, s/p.)

Em que:

F_{zo} = carga na roda externa;

F_{zi} = carga na roda interna;

F_y = Força lateral = $F_{yi} + F_{yo}$

h_r = altura do centro de rolagem;

t = distância entre roda(bitola);

K_ϕ = rigidez de rolagem da suspensão;

ϕ = ângulo de rolagem da suspensão.

Dessa forma a matemática desempenha um papel muito importante na percepção e projetos de sistemas de transferência de carga, ajudando a modelar o comportamento do veículo e a desenvolver soluções que melhorem a estabilidade e a segurança durante a condução.

6.4 Limiar de tombamento estático- SRT

O Limiar de Tombamento Estático – SRT (Static Rollover Threshold), é ângulo máximo que um caminhão pode inclinar antes de acontecer o tombamento, esse valor depende vários fatores, como a altura do centro de gravidade do caminhão, largura da base do veículo e também da distribuição do peso. Dessa forma o limiar de tombamento é representado pelo valor da aceleração lateral capaz de levantar os pneus do veículo do lado interno da curva, a partir desse momento o tombamento é considerado inevitável. O limite de tombamento de um veículo é um cálculo extremamente importante, visto que através dele várias ações são tomadas, como velocidade máxima permitida em curvas, todavia o cálculo é diferente para cada tipo de veículo

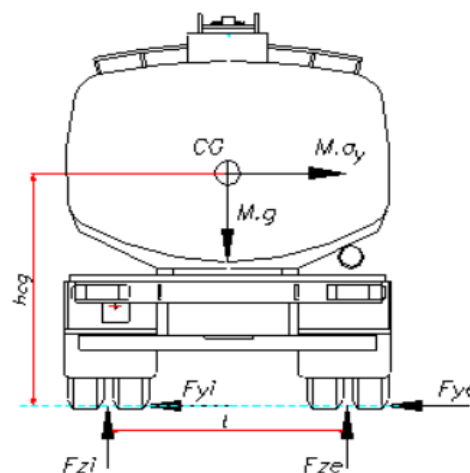
e de terreno, dificultando assim o mapeamento de todas as vias e a possibilidade dos órgãos responsáveis executar o cálculo de todos os pontos críticos e determinar a velocidade ideal de todos os pontos. Assim a divulgação desse cálculo e das forças que interferem na condução do veículo pode se o ponto entre o acidente ou não.

Para calcular o limiar de tombamento precisa-se seguir alguns passos, primeiro devemos determinar a altura do centro de gravidade, para isso precisamos conhecer a localização do CG em relação ao solo e ao eixo traseiro do caminhão. Essa informação pode ser encontrada no manual do proprietário como também em tabelas técnicas fornecidas pelo fabricante. Em seguida calcula-se a largura da base do caminhão, essa medida é encontrada entre os pneus do eixo dianteiro e do eixo traseiro do caminhão. O terceiro passo é determinar a massa total do caminhão e de sua carga, é fundamental também saber a distribuição do peso, ou seja, quanto peso está disposto em cada eixo do caminhão.

Segundo, AASHTO, associação americana responsável pelo projeto geométrico das rodovias dos Estados Unidos, em *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2001*, traz o cálculo do SRT.

A dinâmica do tombamento envolve a dinâmica dos veículos e o balanço das forças que podem usar modelos de diversas complexidades. Na figura 11, é possível observar o diagrama de um veículo de carga rígido, em velocidade longitudinal constante e em movimento curvilíneo de raio constante.

Figura: 11- Diagrama de um veículo rígido em movimento curvilíneo e pista plana



Fonte: Melo (cortesia)

Percebe-se, através da figura, que pelo fato de ser um veículo rígido (sem suspensão), o veículo gira entorno de seu eixo longitudinal, também assume-se que a manobra é em raio constante e velocidade longitudinal constante. As forças F_{zi} e F_{yi} e também F_{ze} e F_{ye} , são resultado das combinações das forças sobre os pneus do veículo. É fato que o tombamento em curva surge a partir da aceleração perpendicular ao vetor velocidade longitudinal do veículo, atuando sobre o centro de gravidade (CG). Essa aceleração no movimento de curva é:

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

Em que R é o raio da curva e V é a velocidade longitudinal.

O par de forças horizontais aplicado nos pneus (F_{yi} e F_{ye}) é criado no veículo reagindo à força centrípeta causada pela aceleração lateral.

De acordo com a segunda lei de Newton, o veículo em superfície plana o somatório dos momentos em relação ao ponto “e” é representado por:

$$F_{zi} \cdot t + M \cdot a_y \cdot h_{cg} - \frac{1}{2} \cdot M \cdot g \cdot t = 0 \quad (2)$$

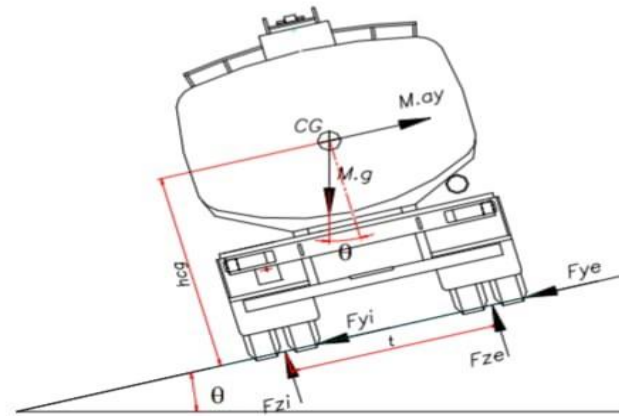
Onde h_{cg} é a altura do centro de gravidade e t é a distância entre os centros das rodas (bitola dos eixos).

Segundo Rubem Penteado, a equação acima pode ser resolvida para a aceleração lateral em unidades de g 's, simplificando:

$$\frac{a_y}{g} = \frac{t}{2h_{cg}} - F_{zi} \cdot \frac{t}{M} \cdot g \cdot h_{cg} \quad (3)$$

O diagrama a seguir representa o caso da pista inclinada.

Figura 12: Diagrama de um veículo rígido em pista inclinada e movimento curvilíneo



Fonte: Melo (cortesia)

$$M.ay \cdot hcg + Fzi \cdot t - M.g \cdot hcg \cdot \sin\theta - \frac{1}{2} M.g \cdot t \cdot \cos\theta = 0 \quad (4)$$

Assumindo que para ângulos pequenos, pode-se considerar, $\sin\theta \approx \theta$ e $\cos\theta \approx 1$, e reorganizando e resolvendo, temos que:

$$Ay/g = t/2hcg + \theta - Fzi \cdot t / M \cdot g \cdot hcg \quad (5)$$

De acordo com os diagramas apresentados, as equações 3 e 5, representam a força da aceleração lateral em uma curva de raio constante e velocidade longitudinal também constante, em pista plana e inclinada, como apresentado respectivamente.

Segundo o limiar de tombamento, no instante que o veículo começa a tombar, a força normal do lado interno da curva (F_{zi}) torna-se igual a zero, portanto nesses dois casos temos as seguintes equações:

Pista plana:

$$Ay/g = t/2hcg \quad (6)$$

Pista inclinada:

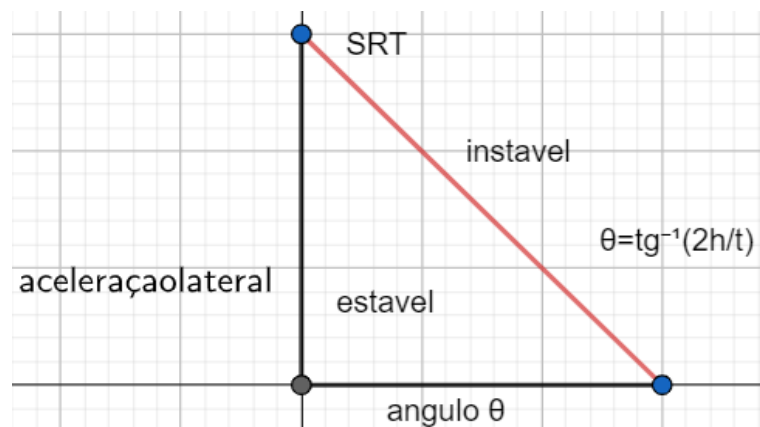
$$A_y/g = t/2hg + \theta \quad (7)$$

Assumindo que o veículo é rígido, quando a aceleração lateral do veículo for igual a $t/2h$ em uma pista plana, o veículo irá iniciar o tombamento. Esse valor de aceleração é o chamado Limiar de Tombamento Lateral Estático SRT, (Static Rollover Threshold).

A figura 13 a seguir traz a linha de instabilidade de um veículo rígido, representando a equação número 7, a reta, em vermelho une as duas posições extremas possíveis no gráfico, quando $a_y = 0$ e quando o ângulo de inclinação $\theta = 0$.

Como demonstrado pelo gráfico, em pista plana o veículo torna-se instável quando a aceleração lateral atinge o valor SRT. Quando não há aceleração lateral, o ângulo de inclinação da pista precisa ser igual ao arco tangente de $2.h/t$ para o veículo tombar. Esse ponto corresponde ao momento que o Centro de Gravidade do veículo ultrapassa o plano perpendicular à pista e que contem a linha que liga duas rodas do veículo. A partir desse ponto o tombamento é considerado inevitável.

Figura: 13 - Gráfico da equação da estabilidade de um veículo em pista inclinada



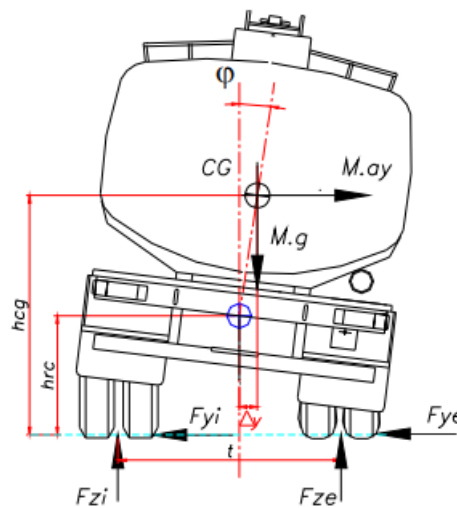
Fonte: Autor (2023)

Contudo, percebe-se que esse modelo que é apresentado de veículos rígidos, contém alguns problemas por desconsiderar variáveis importantes para a estabilidade, como a suspensão e os pneus, assim ele apresenta um valor da aceleração para o tombamento maior que a real. Em muitos casos veículos esportivos ou com centro de gravidades em baixa altura ou bitolas largas, o modelo rígido sugere que a aceleração lateral requerida para o tombamento

é superior aos limites de atrito dos pneus do veículo. Isso significa que o veículo irá deslizar ao invés de tombar. Essa ideia não descreve corretamente o fenômeno em veículos de carga ou veículos com altos centros de gravidades, pois são mais susceptíveis ao tombamento que veículos pequenos, um veículo com alto centro de gravidade é capaz de tombar antes de atingir os limites de atrito lateral dos pneus.

Assim, uma forma mais eficaz de calcular o SRT, deve incluir a possibilidade da massa suspensa, que é a massa suportada pela suspensão do veículo, inclinar-se antes das rodas levantarem do piso.

Figura: 14 - Diagrama de um veículo com suspensão em pista plana e movimento curvilíneo



Fonte: Melo (cortesia)

Na figura percebe-se o surgimento de um ponto imaginário chamado de “Centro de Giro” (roll center), ele localiza-se na conexão entre a massa suspensa e os eixos e representa o centro do movimento angular que ocorre, considerando-se essas novas variáveis se passa a ter a seguinte equação de equilíbrio:

$$M. ay. hcg. Fzi - t - M. g. \left[\frac{t}{2} - (hcg - hrc). \tan \phi \right] = 0 \quad (8)$$

Considerando $\tan \phi \approx \phi$, e $Fzi = 0$, tem se:

$$ay/g = t/2hcg [1 - 2/t. (hcg - hrc) . \phi] \quad (9)$$

Assim a aceleração necessária para provocar o tombamento de um veículo com suspensão é igual à aceleração do veículo rígido reduzido pelo fator:

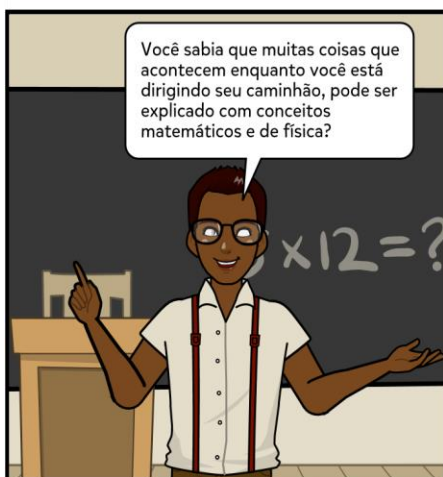
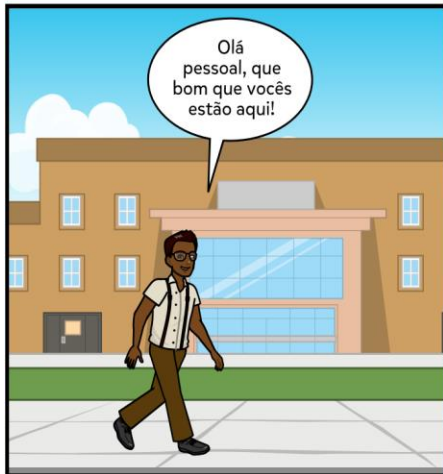
$$\left[1 - \frac{2}{t} \cdot (hcg - hrc) \cdot \phi\right]. \text{ Fonte. (MELO 2018).}$$

Conquanto, o trabalho trouxe os modelos para veículos rígidos e amortecidos, é possível que se encontre modelos mais complexos, que exigirão uma análise própria, contudo derivando-se do mesmo sistema.

7 CARTILHA PARA CONDUTORES DE CAMINHÃO

Segundo proposta do trabalho, entendendo a importância dos condutores de veículos de carga conhecerem as implicações da matemática e da física, que influenciam diretamente na segurança e eficiência da condução, sabendo que eles que são os atores principais, foi criada uma cartilha no formato de quadrinhos, trazendo informações de extrema importância, contudo de forma simples, com o objetivo de auxiliar os condutores de como se comportar diante de situações causadas ou agravadas por implicações matemáticas e assim ser mais uma ferramenta a auxiliar os condutores no seu dia a dia. A cartilha será distribuída durante semana de prevenção de acidentes de trânsito nas blitz educativas através de parceria com autoridades de trânsito e empresas.

Matemática e prevenção de tombamentos



1) Você já percebeu que dependendo do tipo de veículo e da carga, o comportamento do caminhão é diferente? Isso é devido ao centro de gravidade. No caso de um caminhão, o centro de gravidade é determinado pela distribuição de peso do veículo e de sua carga



Quanto mais alto estiver o centro de gravidade de um caminhão, maior será o risco de tombamento. Isso ocorre porque o centro de gravidade influencia a estabilidade do veículo em curvas, manobras e outras situações em que ocorrem forças laterais.



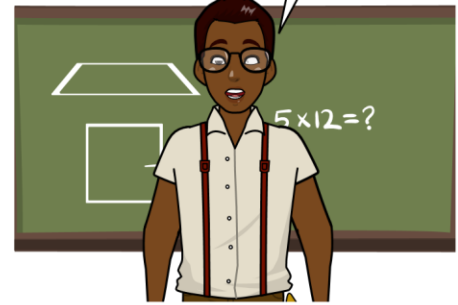
Algumas medidas podem ser tomadas para reduzir o risco de tombamento relacionado ao centro de gravidade:

1-Distribuição adequada de carga: Certifique-se de que a carga esteja distribuída de maneira equilibrada e dentro dos limites estabelecidos. Isso ajudará a manter um centro de gravidade mais baixo e melhorará a estabilidade do veículo.

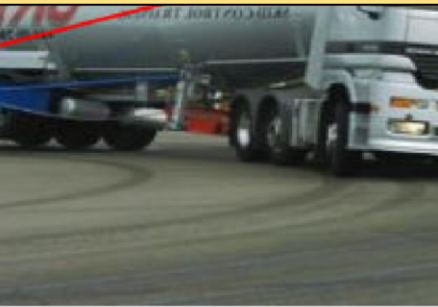
2)-Redução da altura do centro de gravidade: Em alguns casos, é possível reduzir a altura do centro de gravidade do caminhão. Isso pode ser alcançado através de modificações na suspensão, utilizando suspensões mais baixas ou rebaixadas, ou ajustando a posição da carga.

3) - Condução defensiva e adequada: Adote uma condução segura e defensiva, especialmente em curvas ou manobras. Reduza a velocidade ao fazer curvas e evite manobras bruscas que possam causar instabilidade no veículo.

Agora vamos falar de um termo importantíssimo! O Limiar de Tombamento.



O limiar de tombamento é um conceito importante para os motoristas de caminhão, pois está relacionado à estabilidade do veículo durante curvas e manobras. O LIMIAR DE TOMBAMENTO é o ponto em que um veículo, como um caminhão, perde sua estabilidade e começa a se inclinar para o lado durante uma curva ou manobra.



Fatores que devemos ficar atentos para evitarmos o tombamento do caminhão: 1º Centro de Gravidade: Quanto mais alto estiver o centro de gravidade do caminhão, menor será o limiar de tombamento. Portanto, é fundamental distribuir a carga de forma equilibrada e manter o centro de gravidade o mais baixo possível.

2º- Velocidade da Curva: Quanto mais rápido o caminhão estiver indo em uma curva, menor será o limiar de tombamento e maior é a chance de ocorrer o tombamento. É importante reduzir a velocidade ao se aproximar de curvas para manter a estabilidade do caminhão.

Distribuição da Carga: Mais uma vez falamos da carga, pessoal. Uma carga desequilibrada ou mal distribuída pode afetar o centro de gravidade do caminhão e diminuir o limiar de tombamento. Certifique-se de que a carga esteja corretamente posicionada e amarrada de forma segura.

Sinais de aproximação do limiar de tombamento: Existem alguns sinais que indicam que o caminhão está se aproximando do seu limiar de tombamento durante uma curva. Esses sinais incluem:

- 1-Inclinação acentuada do veículo para um dos lados.
- 2-Perda de tração nos pneus.
- 3-Sensação de falta de controle na direção.

Agora o mais importante, pessoal! Como evitar o tombamento?

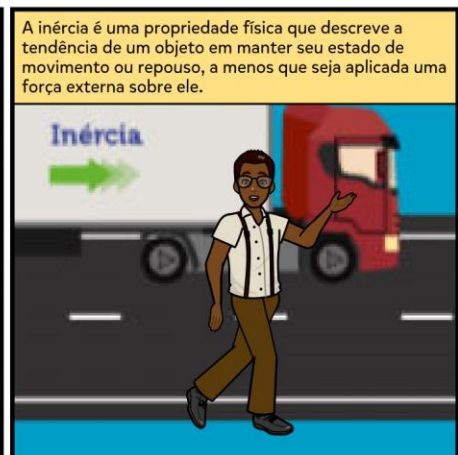
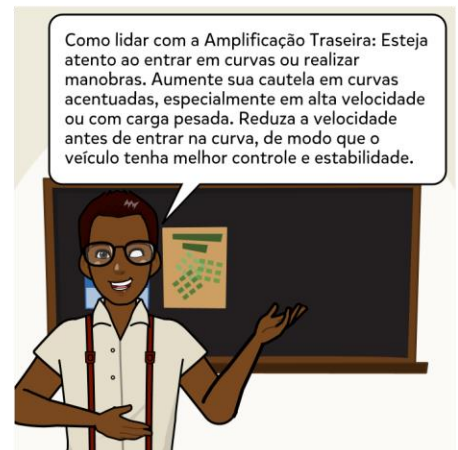


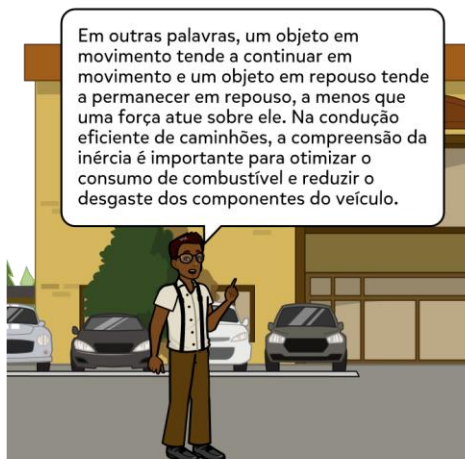
REDUZA A VELOCIDADE ao se aproximar de curvas e manobras. Isso ajuda a diminuir a força centrífuga que atua sobre o veículo. DISTRIBUA A CARGA de maneira uniforme e adequada para manter um centro de gravidade baixo. ESTEJA ATENTO AOS SINAIS de aproximação do limiar de tombamento e ajuste sua velocidade e direção de acordo. EVITE fazer manobras bruscas ou rápidas, pois isso pode levar ao tombamento.

Treinamento e prática: Além de entender o conceito de limiar de tombamento, é essencial que os motoristas de caminhão recebam treinamento adequado sobre técnicas de condução segura. Praticar manobras em diferentes condições de estrada e carga pode ajudar a desenvolver habilidades de condução que minimizam os riscos de tombamento.

Agora vamos falar de mais um tema muito importante para nossa segurança! a AMPLIFICAÇÃO TRASEIRA.

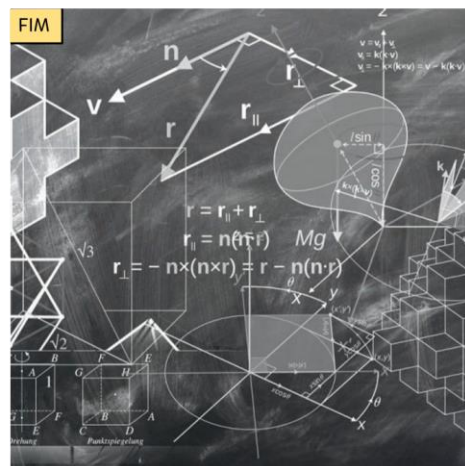






Aqui estão algumas maneiras de utilizar a inércia para uma condução mais eficiente: 1. **Aceleração suave:** Ao iniciar a aceleração do caminhão, evite acelerar bruscamente. Isso permitirá que o veículo ganhe velocidade gradualmente, aproveitando a inércia para reduzir a carga no motor.

2 - **Antecipe as paradas:** Ao se aproximar de sinais de trânsito, cruzamentos ou congestionamentos, reduza gradualmente a velocidade antes de frear. Isso permite que o caminhão desacelere naturalmente, aproveitando a inércia, em vez de depender apenas dos freios.



8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando de estabilidade lateral e prevenção de tombamentos, o Limiar de Tombamento Lateral Estático (SRT) e Razão de Transferência de Carga Dinâmica (DLTR), são medidas extremamente importantes, visto que essas duas medidas entre si refletem as situações mais comuns em que ocorrem o tombamento. Deve-se notar que eles não são independentes. Quando um veículo executa uma manobra de mudança de faixa, há um efeito chicote para que a unidade traseira da combinação experimente mais aceleração lateral do que a unidade dianteira que chamamos de Amplificação traseira como vimos anteriormente. O quão perto a unidade traseira chega do tombamento está relacionado ao seu SRT. Assim, o DLTR está relacionado tanto à magnitude do efeito chicote quanto ao SRT.

Um estudo realizado em 1999 pela Agência de transportes da Nova Zelândia, caracterizada pelas medidas de desempenho, mostra a relação entre o risco de capotamento e o desempenho de estabilidade caracterizado pelo SRT, em que se observa que os veículos com pior desempenho (aqueles com $SRT < 0,3g$) têm a possibilidade três vezes maior de se envolver em acidente do tipo tombamento. Fonte: *SRT Calculator User Guide*.

Ainda, segundo Muller *et al*, os veículos podem ser classificados segundo seu SRT, de forma que:

- Bom – com $SRT > 0,35$;
- Médio – com SRT entre 0,30 e 0,35;
- Ruim – com $SRT < 0,30$

Fonte: (TH MULLER, 1999)

O conhecimento do cálculo do SRT e DLTR é ainda mais importante devido à complexidade dos testes, na medida em que eles podem ser determinados fisicamente por meio da instrumentação dos conjuntos em pista de teste para medição dos parâmetros. Especialmente o DLTR, em que os testes são extensos e complexos, conforme a figura 15, simulações dinâmicas

em softwares também requerem substanciais dados e características técnicas nem sempre disponíveis, como rigidez da suspensão e rigidez torsional da estrutura do veículo, sendo inviável quando pensamos em grandes frotas.

Figura 15: Ensaio para determinação de parâmetros de estabilidade



Fonte: Dynamics (2023)

O SRT, também pode ser mensurado através da mesa de ensaio (*Tilt Table*), conforme figura 16. Nesse ensaio a plataforma é inclinada até os pneus perderem o contato com o piso, dessa forma, a tangente do ângulo capaz de provocar esse efeito corresponde ao valor do SRT do conjunto em "g". Esse teste é também pouco acessível e bastante caro, tornando-o inviável para grandes frotas.

Figura 16. Plataforma "*Tilt Table*", ensaio para verificação de SRT



Fonte: Dynamics (2023)

Dessa forma, a maneira mais viável e utilizada pelos autores para avaliação da estabilidade lateral de um veículo de carga é o Limiar de Tombamento Lateral Estático- SRT, que expressa a aceleração lateral em “g” máxima que um veículo suporta antes do tombamento.

A partir do conhecimento do limiar de tombamento, Amplificação traseira, Área de varredura e demais implicações matemáticas apresentadas aqui nesse trabalho, servem de parâmetros para gestores de frotas e profissionais responsáveis pela segurança de condutores, construir treinos e ferramentas de segurança, assim como determinar velocidade ideal de trânsito, sobretudo em áreas não sinalizadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, **Guide for the Planning, Design, and Operation of Pedestrian Facilities**, AASHTO, Washington, D.C., 2002 (forthcoming)

BARRETO, L. **Fundamentos de Dinâmica Veicular Estabilidade Direcional** (2014). Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/1596626/>. Acesso em 15 maio 2023.

BARTLETT, MS. **A concepção estatística dos fatores mentais**. *British Journal of Psychology*, 28,p. 97-104. (1937).

BRÜGE, U.; LARSSON, J. (1993) **Models for predicting accidents at junctions where pedestrians and cyclists are involved. How well do they fit? Accident Analysis & Prevention**, v. 25, n. 5, p. 499-509, 1993.

CARDOSO Gilmar; GOLDNER Lenise Grando, **Transportes**, v. XV, n. 2, p. 43-51, 2007.

CONCEIÇÃO, G.; SANTOS, B.; MENEZES, V.; TORRES, L. **A importância da aplicabilidade da matemática no cotidiano**: Perspectiva do aluno jovem e adulto. In: II Encontro Científico Multidisciplinar da Faculdade Amadeus: qualificação profissional e inserção no mercado de trabalho, Aracaju 2006.

D'AMBROSIO, Ubiratan. **Da realidade à ação: reflexões sobre Educação matemática**. São Paulo, Summus, Campinas, 1986.
Eindhoven University of Technology, 1986.

ESCAP, ONU. **Veículos de combinação mais longos (LCV) para a Ásia e a região do Pacífico: algumas implicações econômicas**. 2007.

GANONG LH. **Integrative reviews of nursing research**. Res Nurs Health; P1.11, 01/10/1987

GESTÃO E SEGURANÇA NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO disponível em:
GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 7th ed. Warrendale, PA. Society of Automotive Engineers, 1992. LTC 30/06/2022.
Highways and Streets, AASHTO, Washington, D.C., 2001.
Highways and Streets, AASHTO, Washington, D.C., 2001.

http://www.guiadotrc.com.br/seguranca/tombamento_veiculos.asp , acesso em 27 de outubro de 2022

LIMA, T.C.S de; MIOTO, R.C.T. **Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica**. Katál, Florianópolis, v.10, spe, 2007.

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-engrubempenteadode-melo-dsc-/?published=t>. Acesso em: 30 outubro de 22.

MORETIN, Pedro A & SINGER, Júlio M. **Estatística e Ciência de dados**. São Paulo, 1ª edição.

MUELLER T.H., ET AL. **Heavy Vehicles Stability Versus Crash Rates**. Transporte Engineering

O ESTADÃO. **Primeiro caminhão do mundo faz 125 anos**. Matéria veiculada no dia 09 maio de 2021. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/primeiro-caminhao-do-mundo-faz-125-anos/>. Acesso em 25 maio 2023.

PAIINEL CNT de acidentes rodoviários, <cnt.org.br> disponível em: <https://www.cnt.org.br/painel-acidente> acessado em 27 de novembro de 2022 .

PIGOZZO, Luiz A. **Consumo de Combustível Uma Questão de Atitude**, 1ª edição, São Pulo 2015.

PIOVEZAN Luís H. **A probabilidade e a estatística na ocorrência de acidentes de trânsito**, São Paulo 01/11/1991

SAID M. Easa., TIMMERMAN, R. W. **Performance analysis at the crossroad of queueing theory and road traffic**. [Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Ryerson Polytechnic University, Washington, D.C. 2003 Mathematics and Computer Science].

FORD MODELO TT. **Universo motor** (2018), Disponível em: <https://universomotor.com.br/2018/07/27/ha-101-anos-ford-apresentava-seu-primeiro-caminha>. Acesso em 25 maio 2023.

URRA MEDINA, E.; BARRÍA PAILAQUILÉN, R. M. **A revisão sistemática e a sua relação com a prática baseada na evidência em saúde**. Revista Latino-Americana de Enfermagem, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 824-831, 2010.