

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA - FAEN  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Calebe Tauber Amaro da Silva**

**DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE IMPACTO PARA  
ACIDENTES COM COLISÕES FRONTAL OU LATERAL**

**DOURADOS-MS  
2022**

CALEBE TAUBER AMARO DA SILVA

**DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE IMPACTO  
PARA ACIDENTES COM COLISÕES FRONTAL OU  
LATERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal da Grande Dourados, como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Dourados-MS, Junho de 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S586d Silva, Calebe Tauber Amaro Da  
DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE IMPACTO PARA ACIDENTES COM  
COLISÕES FRONTAL OU LATERAL [recurso eletrônico] / Calebe Tauber Amaro Da Silva. --  
2022.  
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Rodrigo Borges Santos.  
TCC (Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2022.  
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:  
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Acidentes de trânsito. 2. crash test. 3. impacto frontal. 4. impacto lateral. 5. velocidade de  
impacto. I. Santos, Rodrigo Borges. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

---

**ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aluno: **CALEBE TAUBER AMARO DA SILVA**

Título do trabalho e subtítulo (se houver): **DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE IMPACTO PARA ACIDENTES COM COLISÕES FRONTAL OU LATERAL**

**BANCA EXAMINADORA**

**1. Presidente (orientador):**

Prof. Dr. RODRIGO BORGES SANTOS, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

**2. Membro:**

Prof. Dr. DOUGLAS DOMINGUES BUENO, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – FEIS/UNESP

**3. Membro:**

Eng. M.Sc. JOÃO ANGELO FERRES BROGIN, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – FEIS/UNESP

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos **APROVADO** o aluno acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados, 17 de junho de 2022.

Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos

Prof. Dr. Douglas Domingues Bueno

Eng. M.Sc. João Angelo Ferres Brogin

# Agradecimentos

Eu agradeço primeiramente a Deus por até aqui ter chegado, por toda força, dedicação e perseverança que me foi dada, sem Ele nada teria alcançado.

Agradeço minha família, especialmente meus pais, que me deram todo apoio e motivação por essa trajetória e desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos e ao Eng. e Me. João Ferres Brogin por todas as orientações e comprometimento que resultaram na produção e sucesso deste trabalho, agradeço também Prof. Dr. Douglas Domingues Bueno por toda ajuda e sugestões repassadas a mim.

Agradeço a Delegacia de Polícia Civil da regional de Jales - SP, por permitir e colaborar no desenvolvimento do presente trabalho.

# Resumo

Diante do crescimento exponencial do número de veículos automobilístico no Brasil e conseqüentemente aumento de acidentes de trânsito e suas complicações, este trabalho apresenta um método que pode ser utilizado pelos peritos de acidentes de trânsito para solucionar casos de acidentes classificados como de impacto frontal ou lateral. O método consiste em aplicar o modelo matemático de Campbell e Richard Emori com objetivo de obter a velocidade imediatamente antes do impacto e, para isso, utiliza-se o banco de dados de ensaios de impacto do inglês “*crash test*”, disponibilizados por instituições internacionais como a NHTSA do inglês “*National Highway Traffic Safety Administration*”. É demonstrado como são realizadas as medições da região deformada do veículo impactado, de forma obter a deformação permanente da estrutura do veículo. O método matemático é aplicado juntamente com uma abordagem estatística para considerar variações dos parâmetros do modelo. Além disso, é determinado a classificação de gravidade do acidente de trânsito através da velocidade de danos. E por fim, é aplicado o método apresentado em um estudo de caso.

**Palavras-chaves:** Acidentes de trânsito, crash test, impacto frontal, impacto lateral, velocidade de impacto.

# Abstract

In front of exponential growth of vehicle number automotive in Brazil and consequently the rise of traffic accidents and its complications, the study present and applying a method that auxiliary the experts in traffic accidents in solve some cases of accidents classified as front and side crash. The method consist in applying an mathematical model of Campbell and Richard Emori in objective to obtain the speed immediately before crash, for this, used in database arise from crash test available by international institutions as the NHTSA "National Highway Traffic Safety Administration". Will be show are done the measurements from deformed region of crash vehicle, obtain the permanent deformation from vehicle structure. Also applying in mathematical model statistical tools to develop an data reliability used. That way is possible determine the classification of accident severity of traffic through damage speed. And finally is applying the method presented in an case study.

**Keywords:**Traffic accidents, crash test, front crash, side crash, crash speed.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Frota de automóveis no Brasil e Áreas Metropolitanas – 2008 à 2018 em milhões [Rodrigues, AZEVEDO e RIBEIRO 2019]. . . . .	20
Figura 2 – Número de óbitos em acidentes de trânsito – 2009 à 2019 [Seguras 2014].	20
Figura 3 – Número de feridos graves em acidentes de trânsito – 2005 à 2017 [Seguras 2014]. . . . .	21
Figura 4 – Velocidade e posição do veículo impactado em relação a barreira fixa [Ribeiro 2014]. . . . .	25
Figura 5 – Velocidade e posição da barreira móvel em relação a lateral do veículo no ensaio de impacto lateral [Ribeiro 2014]. . . . .	26
Figura 6 – Movimento da barreira móvel no ensaio de impacto lateral [NHTSA FMVSS-214] . . . . .	26
Figura 7 – Modelo de barreira móvel [MESSRING,2022] . . . . .	27
Figura 8 – Modelo de barreira fixa da NHTSA [Barreira de impacto frontal do ODB]	28
Figura 9 – Vista superior dos posicionamentos das câmeras no ensaio de impacto frontal [Ribeiro 2014]. . . . .	29
Figura 10 – Vista lateral do posicionamento das câmeras no ensaio de impacto frontal [Ribeiro 2014]. . . . .	29
Figura 11 – Vista superior do posicionamento das câmeras no ensaio de impacto lateral [Ribeiro 2014]. . . . .	30
Figura 12 – Gráfico da velocidade imediatamente antes do impacto $v$ em função da deformação permanente do veículo $\delta_p$ . . . . .	35
Figura 13 – Regressão linear da reta de velocidade em função da deformação. . . .	36
Figura 14 – Exemplificação de um conjunto de dados agrupados em subconjuntos de pares. . . . .	37
Figura 15 – Exemplificação do processo de exclusão e reposição de um subconjunto de dados, resultando na construção da 1º e 2º curva. . . . .	38
Figura 16 – Plotagem das 10 retas através da regressão linear. . . . .	39
Figura 17 – Reta média em função dos coeficientes angular e linear médio. . . . .	39
Figura 18 – Veículo com regiões de deformação frontal ou lateral, apresentando o comprimento da região deformada $l_d$ , largura do veículo $L$ e comprimento do veículo $C$ . . . . .	40
Figura 19 – Análise de energia no momento do impacto e regiões correspondentes à energia de deformação permanente e elástica. . . . .	41
Figura 20 – Demarcação das regiões deformadas, partes dessas regiões a serem medidas e ponto central do veículo [Ribeiro 2014] . . . . .	47



Figura 21 – CITROEN C4, veículo de referência em perfeito estado (sem deformação) [NHTSA FMVSS-214] . . . . .	47
Figura 22 – CITROEN C4 deformado após impacto. . . . .	48
Figura 23 – Imagens dos veículos de referência e veículo deformado com as mesmas dimensões e escala. . . . .	49
Figura 24 – Imagem do veículo deformado no centro de referência sugerida pelo software e sobreposta a imagem do veículo de referência (não deformado). . . . .	49
Figura 25 – Visualização da imagem do veículo de referencia a partir da redução da opacidade da imagem do veículo deformado. . . . .	50
Figura 26 – Exemplo da distribuição das retas que medem a deformação na estrutura do veículo e contorno da região lateral deformada visando melhor visualização na construção das retas. . . . .	50
Figura 27 – Tabela 3 - Dados coletados do ensaio do " <i>crash test</i> " realizados pela NHTSA utilizando o protocolo Euro NCAP, constando marca e modelo do veículo, ano do teste, largura da deformação $L$ , profundidade da deformação $C_{med}$ e coeficientes. Parte 01 [Ribeiro 2014]. . . . .	59
Figura 28 – Tabela 3 - Dados coletados do ensaio do " <i>crash test</i> " realizados pela NHTSA utilizando o protocolo Euro NCAP, constando marca e modelo do veículo, ano do teste, largura da deformação $L$ , profundidade da deformação $C_{med}$ e coeficientes. Parte 02 [Ribeiro 2014]. . . . .	60
Figura 29 – Tabela 04 – Valores típicos de $b_0$ em relação a posição do impacto [Ogden 1995]. . . . .	61

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação do tipo de avaria estrutural do veículo em função da velocidade de danos [Silva 2014]. . . . .	43
Tabela 2 – Classificação do grau do acidente de trânsito [Silva 2014]. . . . .	44

# Lista de abreviaturas e siglas

- NHTSA* - *National Highway Traffic Safety Administration*
- IBGE* - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- PNS* - Pesquisa Nacional de Saúde
- DPVAT* - Seguro obrigatório de danos pessoais causados por veículos automotores de vias terrestres, ou por sua carga, a pessoas transportadas ou não
- Datasus* - Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
- Euro – NCAP* - *European New Car Assessment Programme*
- Latin – NCAP* - Programa de Avaliação de Carros Novos para América Latina e o Caribe
- IIHS – HLDI* - *The Insurance Institute for Highway Safety*
- FMVSS* - *Federal Motor Vehicle Safety Standards*
- Vel.* - Velocidade

# Lista de símbolos

$E_c$	Energia cinética
$E_i$	Energia cinética inicial
$E_f$	Energia cinética final
$E_d$	Diferença de energia cinética
$E_m$	Energia mecânica
$m$	Massa do veículo
$v$	Velocidade imediatamente antes do impacto
$v_d$	Velocidade de danos
$v_m$	Velocidade média imediatamente antes do impacto
$C_1, 2, 3 \dots N$	Comprimento das profundidades da deformação estrutural do veículo
$\delta$	Deformação da estrutura do veículo
$\delta_m$	Deformação máxima da estrutura do veículo
$\delta_0$	Parcela da deformação elástica da estrutura do veículo
$\delta_p$	Parcela da deformação permanente da estrutura do veículo
$F$	Força de impacto
$k$	Rigidez da estrutura do veículo
$b_0$	Velocidade inicial para que se tenha o início da deformação permanente na estrutura do veículo
$b_0, med$	Velocidade inicial média para que se tenha o início da deformação permanente na estrutura do veículo
$b_0, hip$	Velocidade inicial hipotética para que se tenha o início da deformação permanente na estrutura do veículo
$b_1$	Relação entre a massa e rigidez estrutural do veículo
$b_1, med$	Relação entre a massa e rigidez estrutural média do veículo
$b_1, hip$	Relação entre a massa e rigidez estrutural do veículo hipotético

$A$	Representa a força máxima por unidade de largura resultante em não deformação
$B$	Representa a relação entre força e a deformação
$l_d$	Comprimento da região deformada do veículo
$L$	Comprimento da região deformada do veículo com referência nas tabelas
$C$	Comprimento do veículo
$N$	Número de elementos
$E_{DP}$	Energia de deformação permanente
$E_{DE}$	Energia de deformação elástica
$km$	Quilômetro
$h$	Hora

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemática</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo</b>	<b>22</b>
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Secundários	22
<b>1.3</b>	<b>Organização</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Definição de Crash Test</b>	<b>24</b>
<b>2.2</b>	<b>Sobre a NHTSA</b>	<b>24</b>
2.2.1	Protocolo da NHTSA - Impacto frontal	25
2.2.2	Protocolo da NHTSA - Impacto lateral	26
2.2.3	Características da barreira móvel	27
2.2.4	Características da barreira fixa	27
2.2.5	Posição das câmeras no ensaio de impacto frontal e lateral	28
<b>2.3</b>	<b>Equacionamento da velocidade imediatamente antes do impacto</b>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>Equacionamento da força de impacto</b>	<b>32</b>
2.4.1	Hipoteses adotadas	34
<b>2.5</b>	<b>Método para coleta de dados</b>	<b>34</b>
2.5.1	Método computacional para obter $b_0$ e $b_1$	35
2.5.2	Análise estatística do método matemático	36
2.5.3	Método das tabelas para obter $b_0$ e $b_1$	40
<b>2.6</b>	<b>Análise da força de impacto em função da deformação</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>EQUACIONAMENTO DA VELOCIDADE DE DANOS</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Características de identificação do acidente de trânsito em barreira fixa ou móvel</b>	<b>45</b>
4.1.1	Estudo de caso: Etapas de como proceder em uma análise pericial para os casos de acidente de impacto frontal ou lateral	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>54</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>54</b>

---

	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>APENDICE 1</b> .....	<b>58</b>
<b>A.1</b>	<b>Tabelas de dimensões e coeficientes obtidos através do ensaio de "crash test" realizados pela NHTSA utilizando os protocolos da Euro NCAP.</b> .....	<b>58</b>

# 1 Introdução

O início da motorização foi marcado no século XX, onde as primeiras montadoras chegaram ao Brasil [Silva 2011]. Após esse marco a venda e uso de veículos motorizados cresceu exponencialmente em todo país, até os dias de hoje. Em vista ao cenário atual, muitas das cidades brasileiras estão cada vez mais sobrecarregadas de automóveis. Como na maioria das partes do mundo o carro privado torna-se o modo de transporte predominante, tendo em vista vantagens em comparação ao transporte público, como por exemplo conforto, liberdade, ganho de tempo e etc.

Em valores absolutos, o aumento da frota de automóveis ainda está concentrado nas maiores cidades e regiões metropolitanas. Municípios de menor porte populacional também apresentam crescimento relativo e ritmos mais elevados, sobretudo após 2010. Sendo que as 17 principais regiões metropolitanas são responsáveis por 40% desse crescimento. Ou seja, as cidades que enfrentam os piores problemas de trânsito e transporte continuam recebendo boa parte da carga de novos automóveis que passaram a povoar as ruas nos últimos anos [Rodrigues, AZEVEDO e RIBEIRO 2019].

De acordo com [Rodrigues, AZEVEDO e RIBEIRO 2019], entre 2008 e 2018 foram acrescidos à frota brasileira um total de 28,6 milhões de automóveis. Depois do acréscimo de 2,4 milhões ocorrido apenas entre o final de 2017 e o final de 2018, o país passou de 37,1 milhões para uma frota superior a 65,7 milhões de automóveis. A taxa de motorização passou de 19,6 automóveis para cada 100 habitantes em 2008 (quando a frota nacional estava em torno de 37,1 milhões) para 29,7 automóveis por 100 habitantes em 2018. A figura 1 mostra a evolução da frota de automóveis em números, que exibem claramente a dimensão expressiva desse aumento nos últimos anos.

Com o grande aumento de veículos circulando pelas vias de trânsito brasileiras, os índices nacionais de acidentes de trânsito marcam números altíssimos. Segundo o [IBGE, 2021] citado por [Valor-Econômico, 2021], o Brasil teve 3,876 milhões de pessoas que se envolveram em acidente de trânsito com lesão corporal em um período de um ano, mostra a Pesquisa Nacional de Saúde (PNS) referente a 2019 e divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O estudo aponta que entre os que se envolveram neste tipo de acidente, quase metade (48,2%) deixaram de realizar quaisquer uma de suas atividades habituais e 60,6% receberam algum tipo de assistência de saúde [Rodrigues, AZEVEDO e RIBEIRO 2019].

Os acidentes de trânsito são uma das principais causas de morte no mundo, o que os tornam um caso de saúde pública. Para o caso de acidentes de trânsito com óbitos, os números são ainda mais assustadores. Segundo o Ministério da Saúde foi registrado 31.307



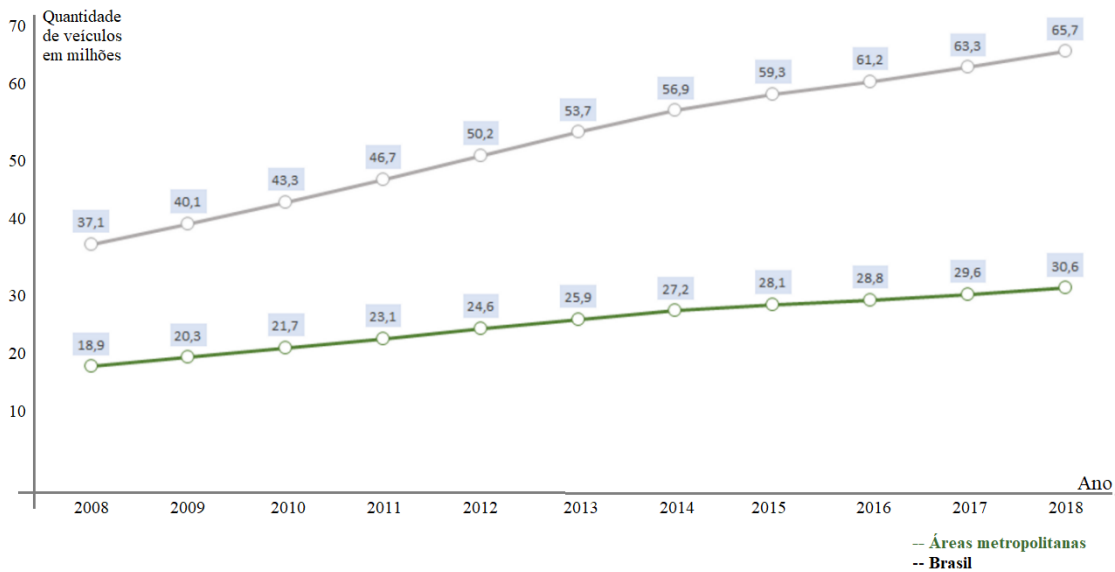


Figura 1 – Frota de automóveis no Brasil e Áreas Metropolitanas – 2008 à 2018 em milhões [Rodrigues, AZEVEDO e RIBEIRO 2019].

óbitos em 2019 e 204.000 feridos hospitalizados em 2015, e o Seguro DPVAT, em 2019, 40.721 indenizações por morte e 235.456 por invalidez [Seguras 2014].

A figura 02 mostra o número de óbitos registrados pelo Ministério da Saúde de 2009 a 2019, com uma diminuição de 28,5% de 2010 a 2018, isto é, no período da Década Mundial de Segurança 2011-2020. Os dados apontam que, quanto maior a segurança nas vias de trânsito menores os índices de acidentes [Seguras 2014].

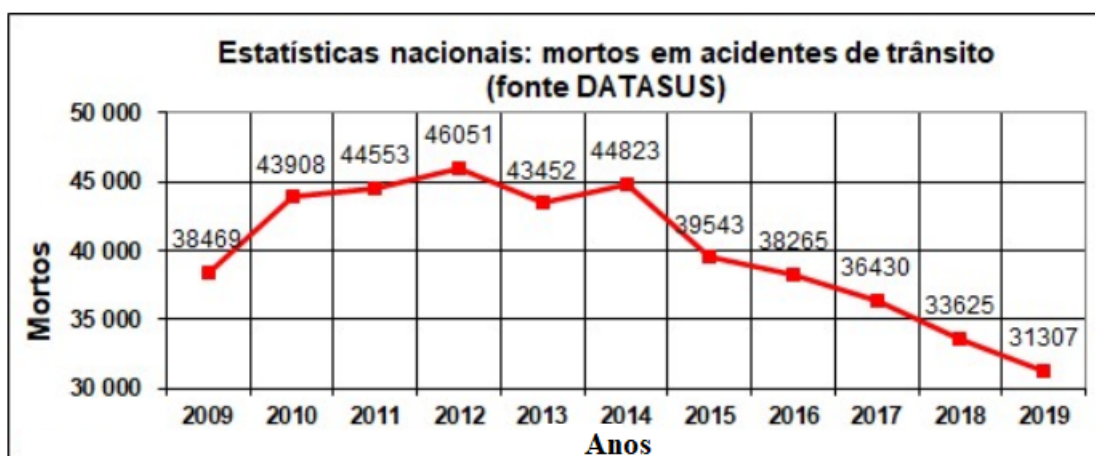


Figura 2 – Número de óbitos em acidentes de trânsito – 2009 à 2019 [Seguras 2014].

A figura 3 mostra a evolução de 2005 à 2015 para o Datasus e de 2005 à 2017 para o DPVAT, de dois indicadores referentes aos feridos que sofreram lesões graves. Isso mostra a gravidade dos acidentes de trânsito e suas consequências, devendo ser abordado com seriedade [Seguras 2014].



Figura 3 – Número de feridos graves em acidentes de trânsito – 2005 à 2017 [Seguras 2014].

## 1.1 Problemática

A partir do crescimento da quantidade de veículos no país, o Brasil registou um grande número de acidentes de trânsito nos últimos anos. Trazendo em foco em solucionar o caso dos acidentes, apontar o motivo causador da infração e levantar culpados, todo esse trabalho é de responsabilidade dos peritos em acidente de trânsito, que na maioria dos casos estão atuando em Delegacias de Polícia Civil.

Em face do cenário atual, o Brasil não conta com uma tecnologia de ponta para auxiliar os peritos em solucionar algumas incógnitas diante da possibilidade real de um acidente, para alguns casos que se enquadram o acidente de trânsito em grupos e subgrupos, existem apostilas e guias que os peritos tomam como referência, porém tal material encontra-se desatualizado ou em desuso, até mesmo sugerem valores (dados) que não estão de acordo com a região e condições reais do acidente.

Um dos casos de acidentes que os peritos tem mais dificuldades em analisar e que será proposto uma solução neste trabalho, é o caso de acidente de trânsito em barreira fixa ou móvel, pois nesse tipo de acidente o ambiente não contem marcas de frenagem, dificultando uma aplicação física para modelar tal fenômeno. Essa classificação dar-se-á no caso de o veículo impactar-se contra um objeto (muro, arvore, poste, barreira de contenção e etc.) ou outro veículo (lateral ou traseira do veículo, maquinário agrícola/construção civil), também é considerado que o motorista não tenha nenhum tempo de reação (para o caso da barreira fixa).

Essa classificação de acidente foi escolhida para análise, pois nas vias de trânsito brasileiras são muito utilizadas por veículos de grande porte, como caminhões, carretas e ônibus. O método que será aplicado não depende de terceiros, ou seja de câmeras de

segurança que filmaram a ação ou de uma pessoa que observou o ocorrido, pois o único dado (vestígio) que será coletado pelo perito, resultante do impacto, é a deformação da estrutura do veículo.

O objetivo do trabalho é desenvolver um método capaz de calcular a velocidade do veículo imediatamente antes do impacto, em função de alguns parâmetros do veículo, como suas dimensões, massa e rigidez. E por fim classificar o grau de gravidade do acidente. Esse método tem sido estudado e utilizado por várias instituições governamentais internacionais, como por exemplo NHTAS, Euro NCAP, Latin NCAP e IIHS-HLDI.

A metodologia adotada será levantar um método eficaz e atual para modelar o acidente de trânsito em barreira fixa ou móvel. Esse método consiste em apresentar e aplicar equações físicas, utilizar ferramentas estatísticas para confiança dos dados e imagens do veículo batido (fotografia real) e do veículo em perfeito estado (fotografia real/imagem obtida na internet) para a coleta da deformação permanente utilizando software de edição de imagem e por fim realizar um estudo de caso.

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um modelo matemático que seja eficiente e eficaz para representação do fenômeno físico do acidente de impacto frontal ou lateral, considerando os ensaios em barreiras fixa ou móvel.

### 1.2.2 Objetivos Secundários

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos secundários:

- Obter a velocidade imediatamente antes do impacto para o caso de acidente de impacto frontal ou lateral;
- Aplicar um método estatístico para se obter a confiabilidade dos dados calculados através do equacionamento;
- Classificar o grau de gravidade do acidente de impacto frontal ou lateral.

## 1.3 Organização

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: apresenta a introdução sobre o tema e contexto, bem como os objetivos e organizações que disponibilizaram dados e informações servindo de apoio para a conclusão do mesmo;

Capítulo 2: apresenta o método matemático utilizando-se de interpretações físicas aplicadas no desenvolvimento deste trabalho, como também ferramentas que fornecem confiança aos resultados, mostrando toda a estrutura, layout onde são realizados os ensaios de impacto e os materiais laboratoriais utilizados;

Capítulo 3: desenvolvimento e aplicação do método de classificação da gravidade do acidente de trânsito para impacto frontal ou lateral através da velocidade de danos;

Capítulo 4: aplicação do método apresentado em um caso de acidente de trânsito classificado como impacto frontal;

Capítulo 5: apresenta as conclusões obtidas com o estudo de caso e sugestões para trabalhos futuros.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2.1 Definição de Crash Test

O teste de impacto "*crash test*" é um ensaio de impacto destrutivo aplicado em veículos motorizados e realizado em um ambiente laboratorial, seguindo normas e protocolos estabelecidos em países que tem como lei a realização dos ensaios, tendo como objetivo testar a segurança e resistência da estrutura veicular durante a colisão [Ribeiro 2014]. Os ensaios realizados simulam um acidente de trânsito real, cuja as intensões são coletar todos os dados que se referem ao comportamento estrutural do veículo e que também estão relacionados a segurança dos passageiros.

Tais dados a serem analisados podem representar, força de impacto, aceleração/desaceleração, velocidade, comportamento estrutural, comportamento dos acessórios de segurança e etc., que dependendo da norma ou protocolo, são coletados através da deformação da barreira ou do veículo. Outra forma de coleta é por meio de imagens, ou seja vídeos que são gravados no momento do impacto, as câmeras filmadoras são organizadas em locais estratégicos do laboratório [Ribeiro 2014].

Existem dois principais testes de impacto realizados, um deles é o teste de impacto frontal contra uma barreira rígida (não deformável) e fixa, e o teste de impacto lateral utilizando uma barreira rígida móvel, pode-se também usar uma barreira deformável correspondendo ao impacto em outro veículo ou objeto deformável [Ribeiro 2014].

Nos dias atuais algumas instituições internacionais realizam esses ensaios, que normalmente são financiadas pelo governo ou também feitos por algumas empresas privadas. Uma das instituições mais renomeadas nesse meio é a NHTSA, tendo sua região de atuação nos Estados Unidos da América. Cujo método e protocolos serão utilizados neste trabalho.

## 2.2 Sobre a NHTSA

A NHTSA é uma agência federal do governo Norte-Americano integrada no Departamento de Transportes, foi oficialmente fundada em 1970, com o intuito de defender o interesse público e proteger os consumidores. É encarregada de regular os padrões de segurança na indústria de automóveis e transportes [NHTSA,2022] e [Atuação-NHTSA,2022].

Com o objetivo de reduzir fatalidades, feridos e custos associados com acidentes rodoviários, a NHTSA realiza pesquisa, informa o público e realiza iniciativas de proteção ao consumidor. Investiga defeitos e fiscaliza o cumprimento das normas de segurança

aos fabricantes, autoriza ou bloqueia a importação de veículos e ajuda a regular outros parâmetros, como a economia de combustível e etc. [Atuação-NHTSA,2022].

Um dos objetivos da NHTSA é aplicar as normas regulamentadoras específicas do país para os veículos motorizados, a FMVSS do inglês “*Federal Motor Vehicle Safety Standards*” apresenta as devidas especificações para o design, estrutura, desempenho, durabilidade e todos os utensílios pertencente ao veículo e que são relacionados a segurança dos ocupantes [Ribeiro 2014] e [Atuação-NHTSA,2022].

### 2.2.1 Protocolo da NHTSA - Impacto frontal

Para o ensaio de impacto frontal, tem objetivo de simular um impacto com outro veículo ou contra um objeto fixo. A NHTSA utiliza duas regulamentações para aplicar na realização dos ensaios, sendo eles a norma FMVSS 208 e o protocolo NCAP. A diferença entre ambos é a velocidade de impacto sugerida.

Segundo a FMVSS 208 a velocidade para o ensaio é de 48 km/h (30 mph), e segundo o NCAP realiza-se a 56 km/h (35 mph). Atualmente a maior parte dos ensaios são realizados segundo o NCAP, salvo algumas exceções. A diferença de 8 km/h (5 mph) concebidos pela NCAP produz um aumento de 36% na energia da colisão. O aumento da velocidade permite distinguir as características da deformação mais facilmente [Hollowell et al. 1999]. Pois, são as características de deformação que serão analisadas para coleta através do perito em acidentes de trânsito.

Neste trabalho será considerado o impacto 100% frontal, ou seja, toda a parte frontal do veículo deforma-se com o impacto, como exemplifica a figura 04.

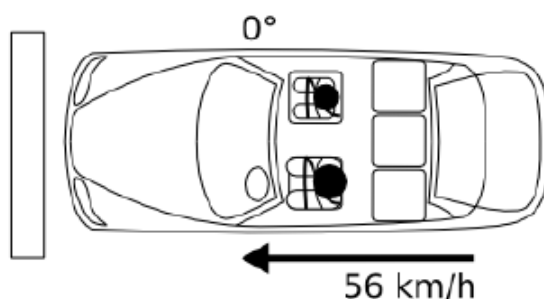


Figura 4 – Velocidade e posição do veículo impactado em relação a barreira fixa [Ribeiro 2014].

### 2.2.2 Protocolo da NHTSA - Impacto lateral

O ensaio de impacto lateral realizado pela NHTSA, tem como objetivo simular um impacto lateral entre dois veículos, ou seja, o veículo que recebe o impacto está parado e outro veículo atinja-o com sua parte frontal perpendicularmente a lateral do outro veículo, como exemplifica a figura 05.

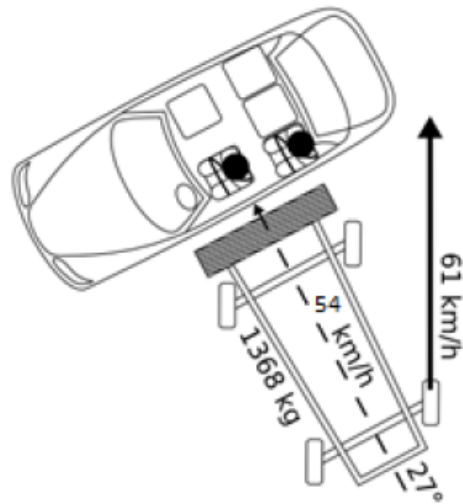


Figura 5 – Velocidade e posição da barreira móvel em relação a lateral do veículo no ensaio de impacto lateral [Ribeiro 2014].

A figura 06 permite visualizarmos o deslocamento que a barreira móvel faz até atingir a lateral do veículo que está sendo ensaiado.

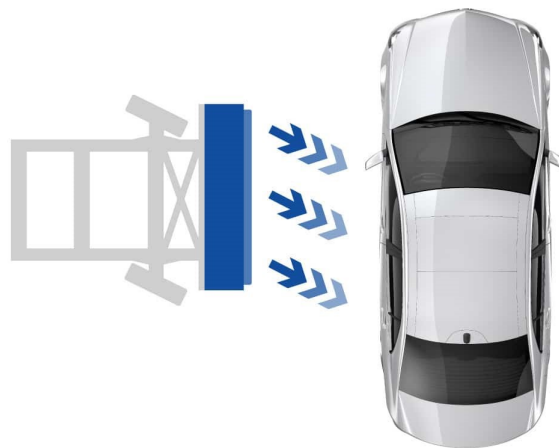


Figura 6 – Movimento da barreira móvel no ensaio de impacto lateral [NHTSA FMVSS-214]

Para esse caso a “barreira” é deformável, sendo composta por uma estrutura móvel que simula outro veículo. Representando uma possível reação do motorista em desviar e evitar o impacto ou perda de controle, a barreira móvel é posicionada com um ângulo

de 27° em relação ao plano perpendicular-horizontal, porém o ângulo de impacto pode ser reajustado em até 0° entre barreira móvel e lateral do veículo ensaiado, como sera mostrado no tópico 2.2.5 para a referência cartesiana da figura 11.

### 2.2.3 Características da barreira móvel

A barreira deformável da NHTSA é construída apenas em alumínio, cujo seu interior tem o formato semelhante à de um “favo”, e todas as suas faces são cobertas por folhas de alumínio, que é acoplada a uma estrutura móvel sendo semelhante a um veículo, como mostra a figura 07. Para os casos de impacto lateral, é considerado o uso da barreira móvel e deformável, como referência dos ensaios em impacto lateral [Thomas 2006] e [ZERO 2015].



Figura 7 – Modelo de barreira móvel [MESSRING,2022]

Os parâmetros adotados para a barreira móvel que comumente são utilizados são apresentados abaixo [NHTSA 2006].

- A massa total é em torno de 1368 kg;
- Comprimento total é de 4115 mm;
- Altura é de 559 mm;
- Largura da barreira é de 1251 mm.

### 2.2.4 Características da barreira fixa

As características de dimensionamento da barreira fixa são proporcionais as dimensões do veículo que será feito o ensaio de impacto. Para o caso da barreira não deformável, o modelo da montagem é o mesmo alterando apenas as espessuras do material da estrutura da barreira, um modelo mais usual que é utilizado durante os ensaios é mostrado na figura 08. Para os casos de impacto frontal, é considerado o uso da barreira fixa e não deformável



como referência dos ensaios em impacto frontal [Parliament 1998] e [Sandner, Ellway e Ratingen 2017].



Figura 8 – Modelo de barreira fixa da NHTSA [Barreira de impacto frontal do ODB]

### 2.2.5 Posição das câmeras no ensaio de impacto frontal e lateral

Para os ensaios de impacto frontal e lateral realizados pela NHTSA, a posição das câmeras no ambiente laboratorial, segue o seguinte layout apresentado nas imagens a seguir.

A figura 09 mostra o posicionamento das câmeras em uma vista superior para o ensaio de impacto frontal, o layout é montado segundo as normas da instituição [ASSURANCE 1990].

Já a figura 10, mostra o posicionamento das câmeras para o ensaio de impacto frontal, com uma vista lateral em relação ao impacto [ASSURANCE 1990].

Para o impacto lateral, o layout de montagem das câmeras é mostrado na figura 11, nesse caso, as câmeras são fixas tanto no ambiente laboratorial como também na barreira móvel e na estrutura do veículo ensaiado [ASSURANCE 1990].

O conjunto de câmeras utilizadas, estão dispostas em locais específicos para capturar cenas de interesse durante o ensaio de impacto. Existem dois modelos de câmeras que podem fazer parte dessa montagem, sendo do tipo *high-speed color digital* e *high-speed color 16 mm motion picture* ou todas câmeras *high-speed digital*. Esses modelos de câmeras podem operar a 1000 fps e têm capacidade de capturar ótimas imagens coloridas com uma excelente resolução [ASSURANCE 1990].

As câmeras tem o objetivo de, durante o momento de impacto, capturar imagens importantes da colisão, que serão analisadas para se estimar dados estruturais do mesmo e principalmente deformação permanente da estrutura do veículo.

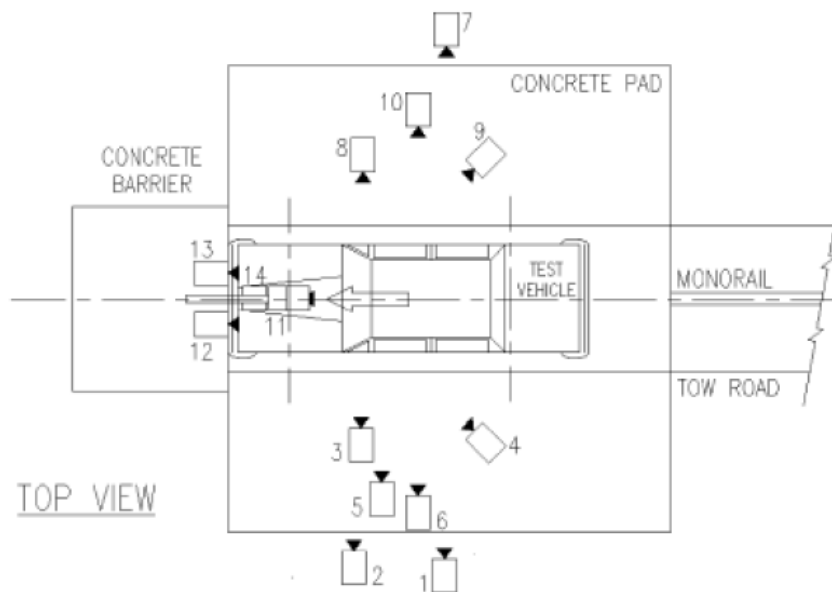


Figura 9 – Vista superior dos posicionamentos das câmeras no ensaio de impacto frontal [Ribeiro 2014].

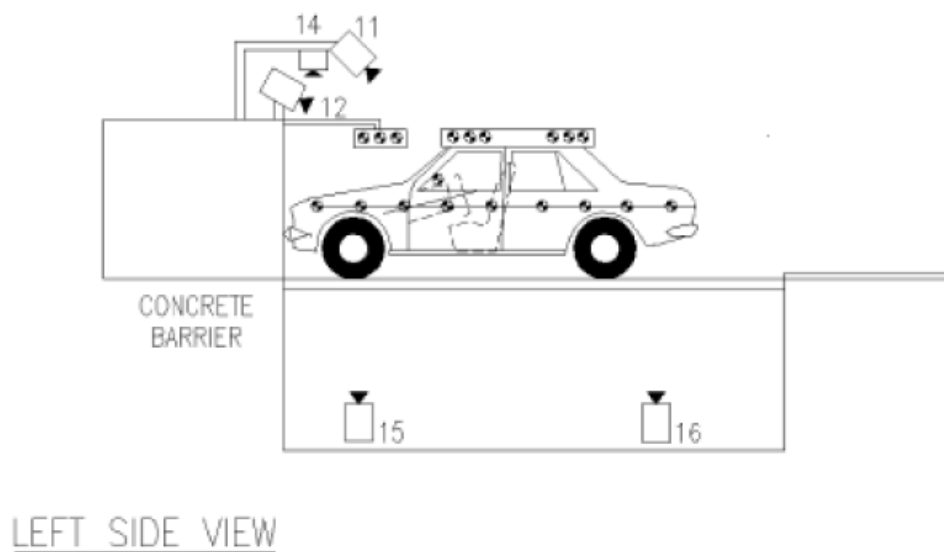


Figura 10 – Vista lateral do posicionamento das câmeras no ensaio de impacto frontal [Ribeiro 2014].

## 2.3 Equacionamento da velocidade imediatamente antes do impacto

Para modelar matematicamente o fenômeno físico do impacto frontal ou lateral, levando em conta uma deformação na estrutura do veículo, primeiramente deve-se considerar o princípio da conservação de energia de Isaac Newton.

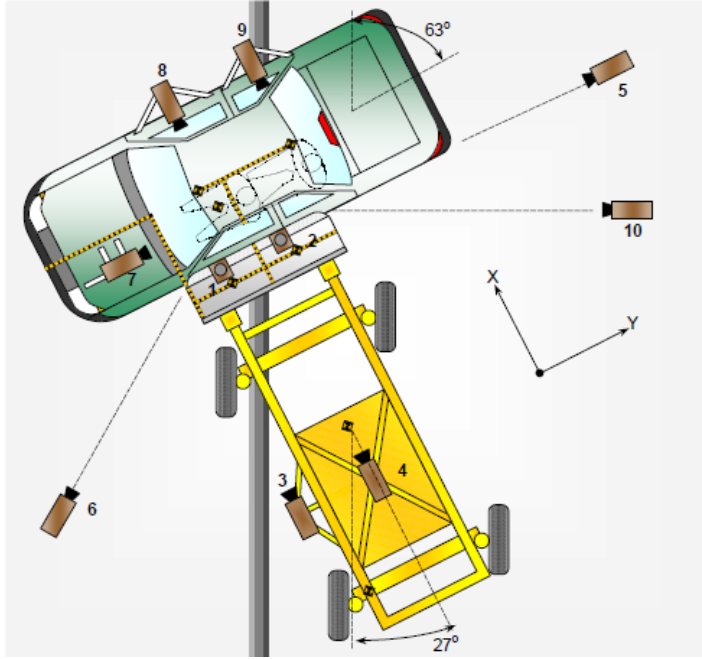


Figura 11 – Vista superior do posicionamento das câmeras no ensaio de impacto lateral [Ribeiro 2014].

Para complementar a modelagem, podemos considerar a energia potencial elástica, que segundo o estudioso Richard Emori em 1968, estudou o comportamento dos impactos entre vários veículos, e conclui que a estrutura dos veículos comporta-se como molas, sendo que a energia cinética  $E_c$  do veículo se iguala a energia potencial elástica da mola [Batista 2005]. A partir dessas afirmações, temos que:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} = \int_0^{\delta_m} F(\delta) d\delta \quad (2.1)$$

sendo  $F$  a força de deformação no momento do impacto, integrando em função da deformação da estrutura do veículo  $\delta$  de 0 até a sua deformação estrutural máxima  $\delta_m$ . A partir da lei de Hook temos que:

$$F = k\delta \quad (2.2)$$

substituindo a equação (2.2) em (2.1), e solucionando a integral, temos que:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{k\delta_m^2}{2} \quad (2.3)$$

para a deformação estrutural do veículo, considera-se uma parcela dessa deformação sendo parte permanente  $\delta_p$  e outra elástica  $\delta_o$  ou seja:

$$\delta_m = \delta_o + \delta_p \quad (2.4)$$

substituindo a equação (2.4) na equação (2.3), temos que:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{k}{2}(\delta_o + \delta_p)^2 \quad (2.5)$$

isolando a velocidade do veículo imediatamente antes do impacto  $v$ , temos que:

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}}(\delta_o + \delta_p) \quad (2.6)$$

a equação (2.6), é composta por dois parâmetros muito importantes, que são adquiridos por meio de tabelas (dados coletados por meio de análise computacional durante os ensaios de impacto executados pela NHTSA). Para melhor compreender esses parâmetros, simplificaremos a equação.

Fazendo a multiplicação dos termos da equação (2.6), temos que:

$$v = \delta_o \sqrt{\frac{k}{m}} + \delta_p \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.7)$$

simplificando a equação (2.7), obteremos o primeiro parâmetro importante  $b_1$ , sendo:

$$b_1 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.8)$$

segundo as normas do NHTSA, a equação (2.6) corresponde a velocidade do veículo, dada em [m/s], que também está relacionada a velocidade para que se tenha o início da deformação permanente na estrutura do veículo  $v_o$  ou seja:

$$v_o = \delta_o b_1 = b_0 \quad (2.9)$$

obtemos então, o segundo parâmetro importante, o  $b_0$ . Substituindo as equações (2.8) e (2.9) na equação (2.7), temos que:

$$v = b_0 + b_1 \delta_p \quad (2.10)$$

temos então, que à equação (2.10) é a velocidade imediatamente antes do impacto do veículo contra a barreira fixa ou da barreira móvel contra a lateral do veículo, sendo um modelo de “*crash test*” proposto por Campbell.

O termo  $\delta_p$  da equação (2.10) é a deformação permanente da estrutura do veículo, esse parâmetro deve ser coletado do veículo deformado através do perito. No decorrer deste trabalho, será apresentado um método para a coleta da deformação permanente da estrutura do veículo.

Para o estudo do impacto frontal ou lateral, será apresentado todos os dados utilizados nesses casos. Como a NHTSA é uma instituição governamental, é possível

acessar o banco de dados completo e todas as informações sobre a realização do ensaio em trabalhos acadêmicos e artigos científicos disponibilizados pela empresa [Ribeiro 2014].

Os principais dados utilizados nesse trabalho, que foram obtidos por análise experimental e computacional, são:

- $b_0$  - Velocidade de impacto que resultará no início da deformação permanente na estrutura do veículo, em [m/s].

O  $b_0$  está relacionado com a deformação elástica causada na estrutura do veículo imediatamente após o impacto, seu valor numérico é pequeno, porém, tem grande influência nos resultados finais da velocidade do veículo imediatamente antes do impacto.

- $b_1$  - Relação entre a massa e rigidez estrutural do veículo, em [1/s].

O  $b_1$  está relacionado com a força que o veículo causa sobre a barreira no momento do impacto.

- $k$  - Rigidez estrutural do veículo, em [N/m].

O  $k$  é um dado de rigidez da estrutura do veículo. Nesse trabalho, adotaremos os valores da rigidez obtidos por análise experimental, utilizado pela NHTSA.

## 2.4 Equacionamento da força de impacto

Foi considerado no tópico anterior, que a estrutura do veículo se assemelha com uma mola, contendo uma parcela de deformação permanente e outra elástica. Para o equacionamento da força de impacto, consideraremos a Lei de Hook, sendo que uma força está sendo aplicada em uma estrutura deformável que possui certa rigidez [Batista 2005]. A partir dessa afirmação, pode-se expressar a força no momento de impacto, a partir da equação (2.2). Substituindo a equação (2.4) na equação (2.2), temos que:

$$F = k(\delta_o + \delta_p) \quad (2.11)$$

Multiplicando os termos da equação (2.11), temos:

$$F = k\delta_o + k\delta_p \quad (2.12)$$

igualando as equações (2.6) e (2.10), a fins de obter uma expressão para a rigidez estrutural  $k$  e a velocidade inicial para que ocorra a deformação elástica  $\delta_o$  temos que.

$$k = mb_1^2 \quad (2.13)$$

Sendo  $m$  a massa do veículo que provoca o impacto e a deformação elástica é dada pela equação (2.14).

$$\delta_o = \frac{b_0}{b_1} \quad (2.14)$$

Substituindo as equações (2.13) e (2.14) na equação (2.12) e simplificando, temos:

$$F = m(b_0b_1 + b_1^2\delta_p) \quad (2.15)$$

Simplificando a equação (2.15), para melhor visualização, temos:

$$F = A + B\delta_p \quad (2.16)$$

sendo

$$A = mb_0b_1 \quad (2.17)$$

$$B = mb_1^2 \quad (2.18)$$

A equação (2.16), refere-se a força no momento do impacto entre o sistema veículo contra a barreira fixa ou a barreira móvel contra a lateral do veículo.

Considerando que a força de impacto seja distribuída sobre o comprimento da região deformada  $l_d$ , temos:

$$A = \frac{mb_0b_1}{l_d} \quad (2.19)$$

O coeficiente  $A$  representa a força máxima por unidade de largura resultante em não deformação dado em [N/m].

A partir da equação (2.19), se obtêm os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ , sendo:

$$b_0 = \frac{Al_d}{mb_1} \quad (2.20)$$

$$b_1 = \frac{Al_d}{mb_0} \quad (2.21)$$

para a equação (2.18), temos:

$$B = \frac{mb_1^2}{l_d} \quad (2.22)$$

o coeficiente  $B$  representa a relação entre força e a deformação dado em  $[N/m^2]$ .

A partir da equação (2.22), se obtêm outra forma de representação matemática para o coeficiente  $b_1$ , sendo:

$$b_1 = \sqrt{\frac{Bl_d}{m}} \quad (2.23)$$

### 2.4.1 Hipoteses adotadas

Algumas partes da energia envolvida e que é transformada no momento do impacto, não é considerada nos cálculos, pois, algumas parcelas dessa energia são perdidas decorrente de fatores naturais.

São consideradas desprezíveis, para os fins deste trabalho as seguintes parcelas de energia decorrente ao impacto, sendo:

1. Energia absorvida através da barreira fixa/móvel ou estrutura do veículo;
2. Energia dissipada no sistema de frenagem e transmissão;
3. Energia dissipada na forma de calor e ruído.

São consideráveis nos cálculos a seguinte parcela de energia decorrente ao impacto, sendo:

4. Energia transformada em deformação elástica e permanente na estrutura do veículo.

Portanto, considera-se que toda a energia cinética do veículo envolvida no momento do impacto é transformada em energia de deformação de sua estrutura.

## 2.5 Método para coleta de dados

Atualmente, existem dois métodos possíveis de obter os dados de  $b_0$  e  $b_1$ . O primeiro deles é através do método matemático elaborado computacionalmente, realizado a partir da técnica dos mínimos quadrados aplicado através da regressão linear. Sendo baseados na curva de deformação permanente do veículo e velocidade imediatamente antes do impacto.

O segundo método consiste em basear os dados  $b_0$  e  $b_1$  no modelo de veículo, características estruturais como por exemplo sua massa, dimensões antes e após o acidente e também na classificação do impacto. Esses dados estão dispostos em forma de tabelas.

### 2.5.1 Método computacional para obter $b_0$ e $b_1$

Existe um problema aparente relacionado as tabelas de dados, como a NHTSA está situada nos Estados Unidos, a variação de modelos de veículos utilizados nos ensaios de impacto, são um pouco diferentes dos modelos mais usuais no Brasil. Dessa forma, a tabela fica incompleta para alguns modelos de veículos no país.

Visando solucionar esse problema, será apresentado a seguir, um modelo matemático para obtermos os parâmetros  $b_0$  e  $b_1$ .

Pode-se observar, que a equação (2.10) é classificada como uma equação do primeiro grau, ou seja, se plotarmos essa equação no plano cartesiano obteremos uma reta, cujo os parâmetros  $b_0$  é o coeficiente linear e o  $b_1$  é o coeficiente angular da reta. Plotando a equação (2.10), obtemos a figura 12, sendo:

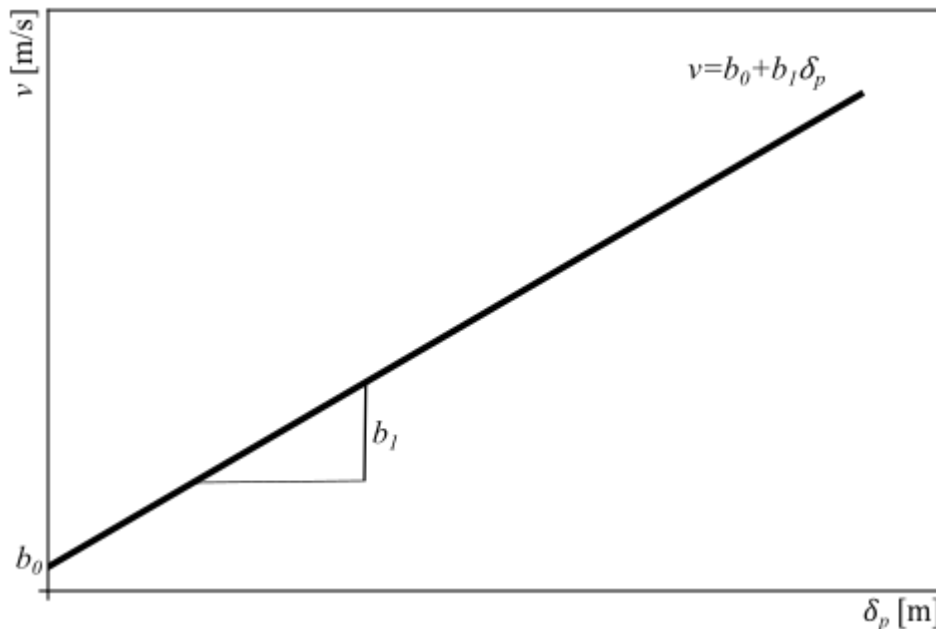


Figura 12 – Gráfico da velocidade imediatamente antes do impacto  $v$  em função da deformação permanente do veículo  $\delta_p$ .

Supúnhamos que para um único veículo, contendo massa  $m$  e rigidez estrutural  $k$  não variáveis, seja realizado o ensaio de impacto frontal 10 vezes, utilizando para cada ensaio um veículo novo (não deformado). Esses ensaios resultaram em 10 valores de velocidade imediatamente antes do impacto  $v$  e deformação permanente  $\delta_p$ .

Plotando os pontos da velocidade imediatamente antes do impacto em função da deformação permanente na estrutura do veículo, e aplicando a regressão linear para esses pontos, obteremos uma reta da velocidade imediatamente antes do impacto em função da deformação permanente na estrutura do veículo, para um único veículo escolhido, como mostra a figura 13.



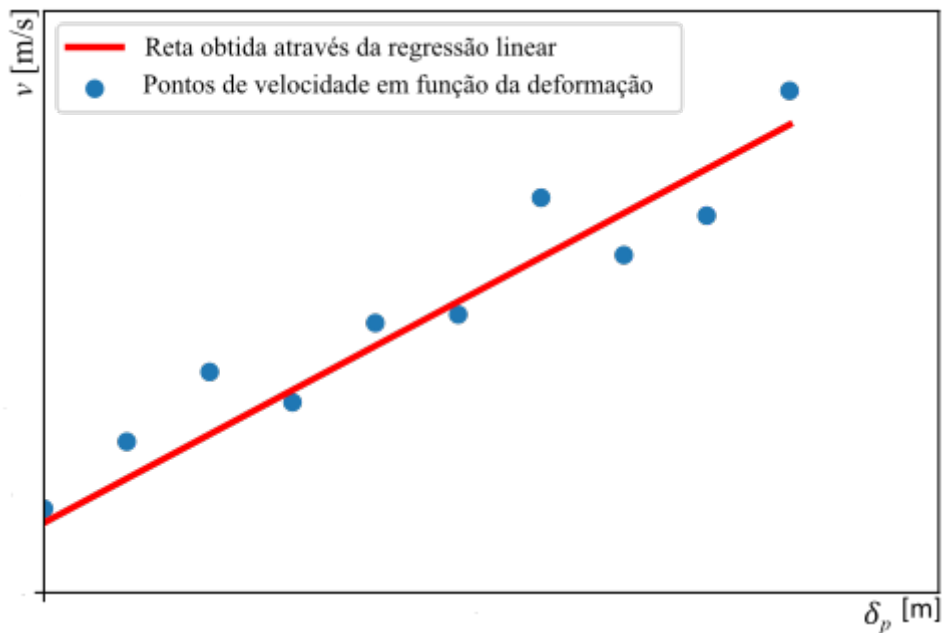


Figura 13 – Regressão linear da reta de velocidade em função da deformação.

Após aplicação da regressão linear, se obteve uma reta que possui os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ . Basta apenas exibir os valores encontrados utilizando os comandos do software de programação. Nos tópicos seguintes, será demonstrado a aplicação desse método que é capaz de gerar uma curva com os dados de interesse.

## 2.5.2 Análise estatística do método matemático

Como o objetivo do perito é obter a velocidade do veículo imediatamente antes do impacto, dada pela equação (2.10), neste tópico será realizada uma análise estatística para desenvolver uma margem de erro hipotética relacionada a equação da velocidade, resultando numa confiabilidade dos dados.

A reta plotada na figura 13, possui uma certa margem de erro, que está associada a nuvem (variação) de pontos ao seu redor. Para montar a margem de erro hipotética, será utilizado o método da reta média, que foi baseado na ideia da técnica de validação cruzada. Sendo seu objetivo, avaliar a capacidade de generalização de um modelo, a partir de um conjunto de dados, tal técnica é amplamente empregada em problemas onde o objetivo da modelagem é a predição. Busca-se então estimar o quão preciso é este modelo na prática, ou seja, o seu desempenho para um novo conjunto de dados [Guimarães et al. 2008].

O método consiste em plotar várias retas através da regressão linear para um conjunto de pontos, obtendo assim, os coeficientes lineares e angulares dessas retas, e por fim, plotar a reta média através dos coeficientes linear e angular médios.

A partir do modelo matemático proposto, os pontos considerados nesse método não são conhecidos, visto que para gerar a curva real implicam em determinar  $b_0$  e  $b_1$  reais, dessa forma, os coeficientes são hipotéticos, podendo ser ou não baseados em valores de  $b_0$  e  $b_1$  das tabelas através de similaridades entre modelos de veículos, como dimensões geométricas, massa e rigidez.

Para comprovar a veracidade do modelo matemático, foi utilizado valores de  $b_0$  e  $b_1$  conhecidos e aplicado um ruído no equacionamento via script (simulando um caso real e criando uma faixa de valores onde  $b_{0,hip}$  e  $b_{1,hip}$  estão contidos). Aplicando então a regressão linear pode-se comparar  $b_0$  e  $b_1$  reais com  $b_{0,hip}$  e  $b_{1,hip}$ , como será feito no estudo de caso.

O conjunto de pontos que será utilizado são 10 pontos de velocidade imediatamente antes do impacto  $v$  e de deformação permanente da estrutura do veículo  $\delta_p$ , totalizando 20 coordenadas. Para a plotagem das retas através da regressão linear, imaginemos um conjunto de 20 coordenadas, contendo 10 subconjuntos de pontos, ou seja, um ponto de  $v$  e outro de  $\delta_p$ , como mostra a figura 14.

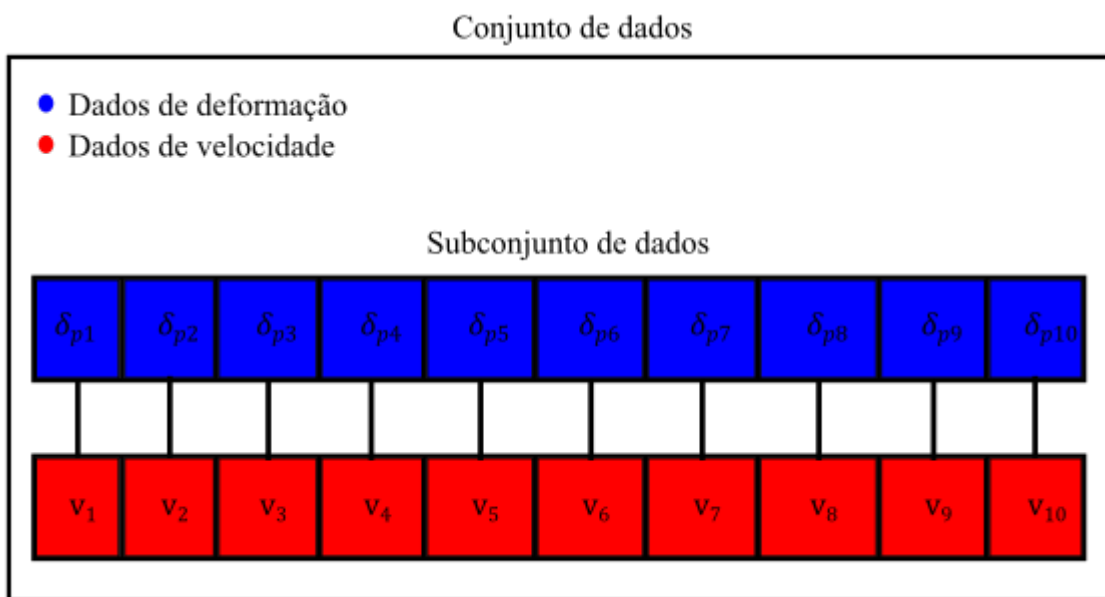


Figura 14 – Exemplificação de um conjunto de dados agrupados em subconjuntos de pares.

Dessa forma seguiremos os seguintes passos, primeiramente retira-se do conjunto o primeiro subconjunto de velocidade e deformação, então plotamos a reta (com 9 pontos) e obtemos os coeficientes linear e angular respectivamente, no segundo passo, adiciona-se o primeiro subconjunto de volta ao conjunto e agora retira-se o segundo subconjunto e plota-se a reta obtendo novamente os coeficientes linear e angular respectivo, como mostra a sequência da figura 15.

E dessa forma ocorrerá sucessivamente até a plotagem das 10 retas através da regressão linear e obteremos então 10 coeficientes lineares e angulares, como mostra a

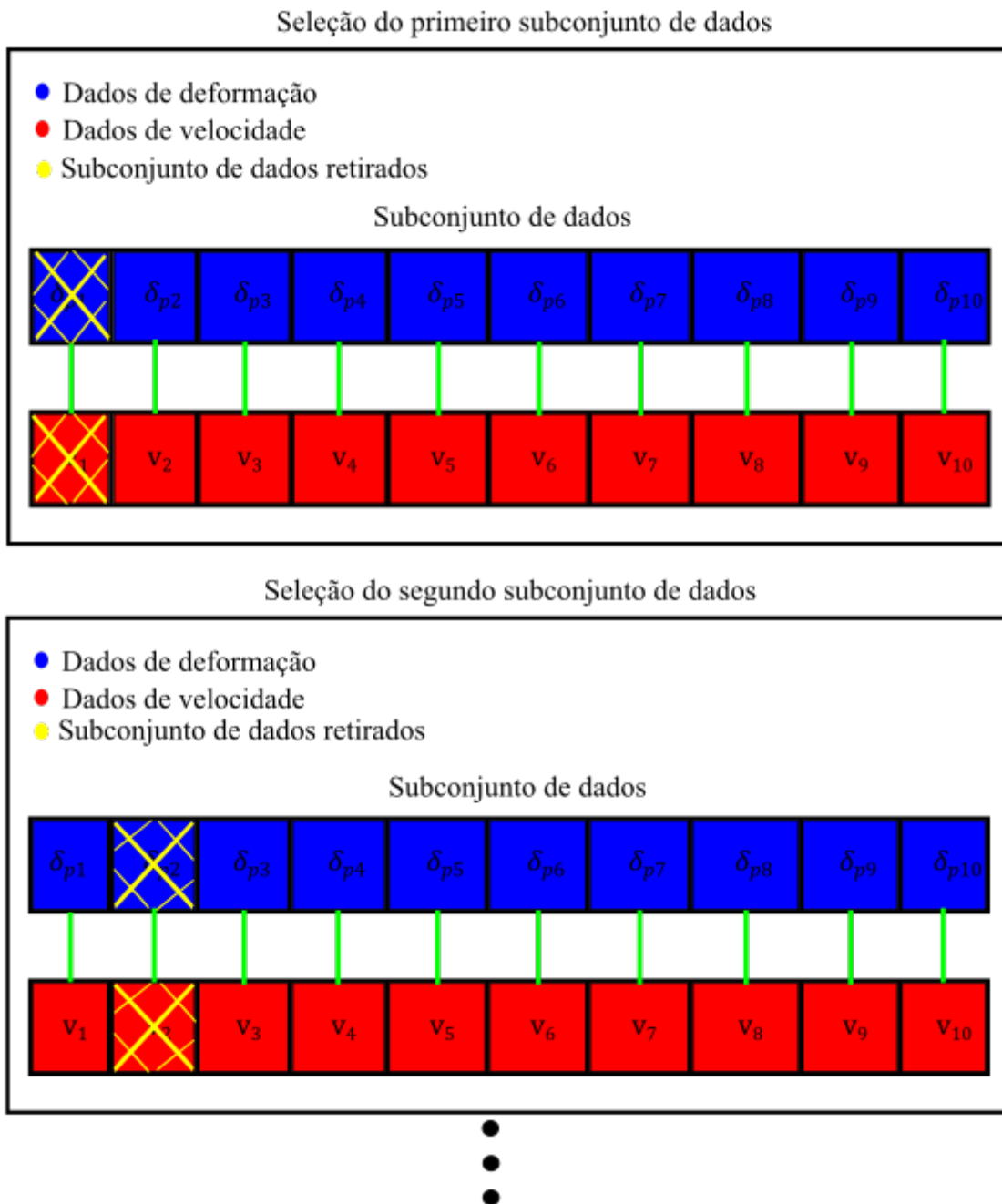


Figura 15 – Exemplificação do processo de exclusão e reposição de um subconjunto de dados, resultando na construção da 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> curva.

figura 16.

Com os 10 valores dos coeficientes linear e angular das retas plotadas, ou seja,  $b_0$  e  $b_1$ , calcula-se a média aritmética desses valores, obtendo então os coeficientes linear e angular médios. As equações 2.24 e 2.25 representam  $b_{0,med}$  e  $b_{1,med}$ , sendo a média aritmética dos coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ .

$$b_{0,med} = \frac{b_{0,1} + b_{0,2} + b_{0,3} + \dots + b_{0,N}}{N} \quad (2.24)$$

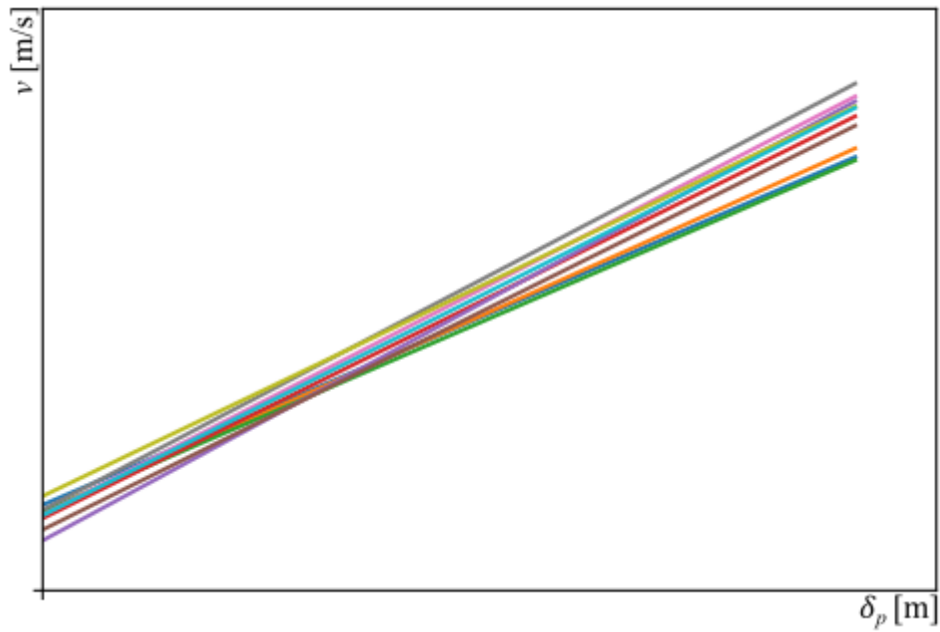


Figura 16 – Plotagem das 10 retas através da regressão linear.

$$b_{1,med} = \frac{b_{1,1} + b_{1,2} + b_{1,3} + \dots + b_{1,N}}{N} \quad (2.25)$$

Utilizando agora os mesmos dados de velocidade e deformação do conjunto, plota-se a reta média em função dos coeficientes linear e angular médios, como mostra a figura 17.

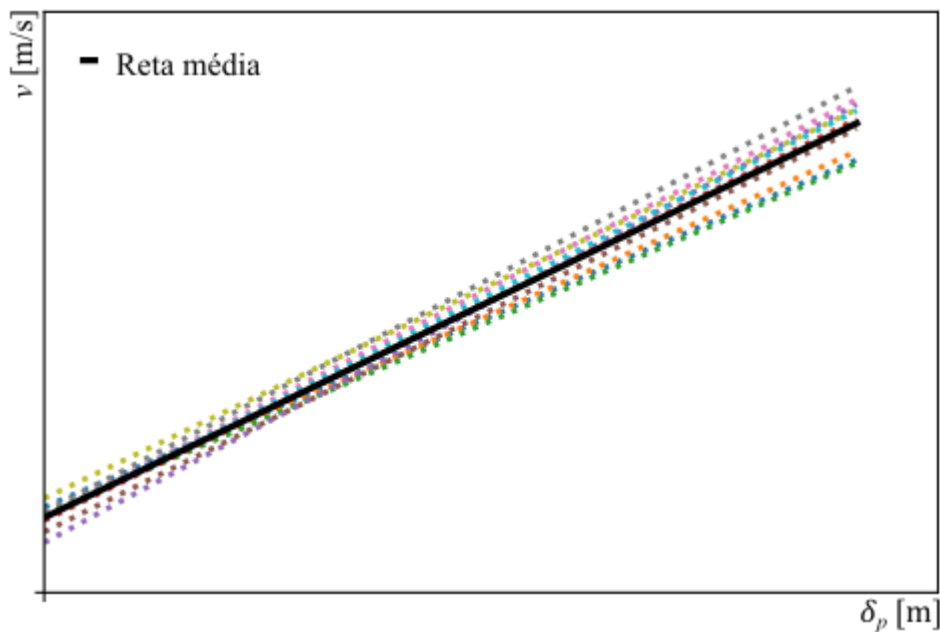


Figura 17 – Reta média em função dos coeficientes angular e linear médio.

Pode-se obter através da reta média, os coeficientes  $b_{0,med}$  e  $b_{1,med}$  e por fim, a velocidade imediatamente antes do impacto  $v$  utilizando o método matemático.

### 2.5.3 Método das tabelas para obter $b_0$ e $b_1$

Como mencionado anteriormente, os dados  $b_0$  e  $b_1$  são obtidos experimentalmente e disponibilizados em diversas formas de tabelas, podendo ser coletados diretamente em função do modelo e parâmetros de um determinado veículo ou através de equações.

Considere o veículo deformado na figura 18, pode-se observar a região de deformação frontal e lateral, essa região tem comprimento  $l_d$ , a largura do veículo é dada por  $L$  e o comprimento do mesmo é dado por  $C$ . O comprimento da região deformada  $l_d$  é um dado coletado pelo perito que é resultante do impacto.

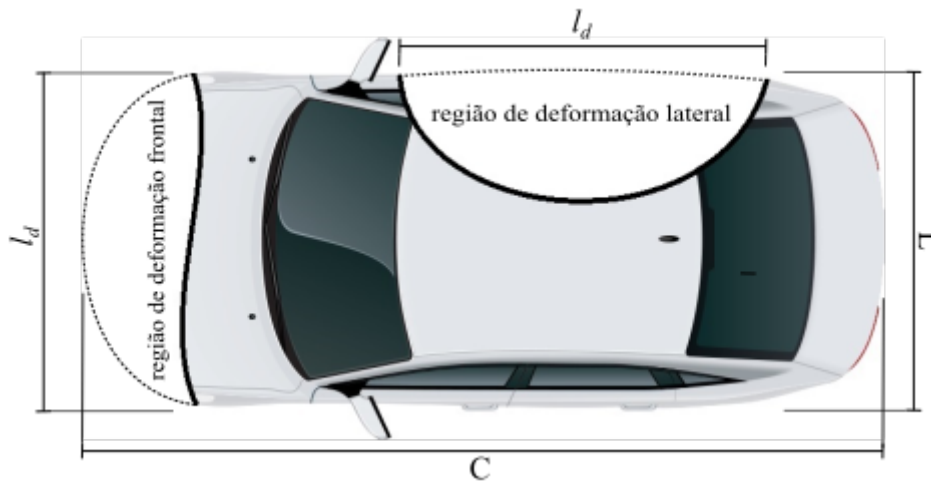


Figura 18 – Veículo com regiões de deformação frontal ou lateral, apresentando o comprimento da região deformada  $l_d$ , largura do veículo  $L$  e comprimento do veículo  $C$ .

## 2.6 Análise da força de impacto em função da deformação

Faremos agora uma análise da equação (2.16) para um caso real de impacto com deformação estrutural, considerando os parâmetros  $m$ ,  $k$ ,  $b_0$  e  $b_1$  de um veículo. Para uma análise de energia, consideramos que toda energia se transforma com uma pequena e mínima parcela perdida, portanto temos que, antes do impacto o veículo possui apenas energia cinética decorrente da sua velocidade, após o impacto a energia cinética transforma-se em energia de deformação, atuando na estrutura do veículo.

Foi simulado computacionalmente na figura 19, uma representação gráfica da deformação da estrutura do veículo em função da força de impacto (curva em laranja), essa curva possui muitos picos e vales, representando o ruído do sistema veículo contra barreira fixa ou barreira móvel contra a lateral do veículo durante o impacto, esse ruído simula um caso real da coleta de dados através de um sensor acoplado no veículo e/ou na barreira, sua existência é decorrente de interferências externas como som, vento, vibração e etc.

Para obter a força e deformação média para essa curva, foi estimada uma reta (em azul) podendo ser considerada uma reta teórica (sendo coincidente com o modelo da equação 2.16). O pontilhado em vermelho representa o momento que a força de impacto atinge seu pico máximo e começa a diminuir, nesse ponto a estrutura do veículo não irá mais se deformar. Já a reta em verde representa a parcela da deformação elástica da estrutura do veículo.

Analisando a figura 19 temos, do ponto A para o B, sendo que o ponto A representa o início do impacto entre veículo e barreira ou barreira móvel contra lateral do veículo, ou seja a força de impacto começa a atuar sobre a estrutura do veículo, resultando na deformação permanente na estrutura do mesmo, essa deformação vai até o ponto B, nesse ponto a força é máxima. Do ponto B até o ponto C, nesse momento a força começa a diminuir e a deformação permanente permanece constante. Do ponto C para o ponto D, representa a deformação elástica da estrutura do veículo, sendo o ponto D o fim do impacto. Entre o ponto C e D, pode acontecer o ricocheteio, momento em que o veículo se afasta da barreira bruscamente.

A figura 19, possui duas regiões, sendo  $E_{DP}$  a região que corresponde a energia de deformação permanente e  $E_{DE}$  a energia de deformação elástica.

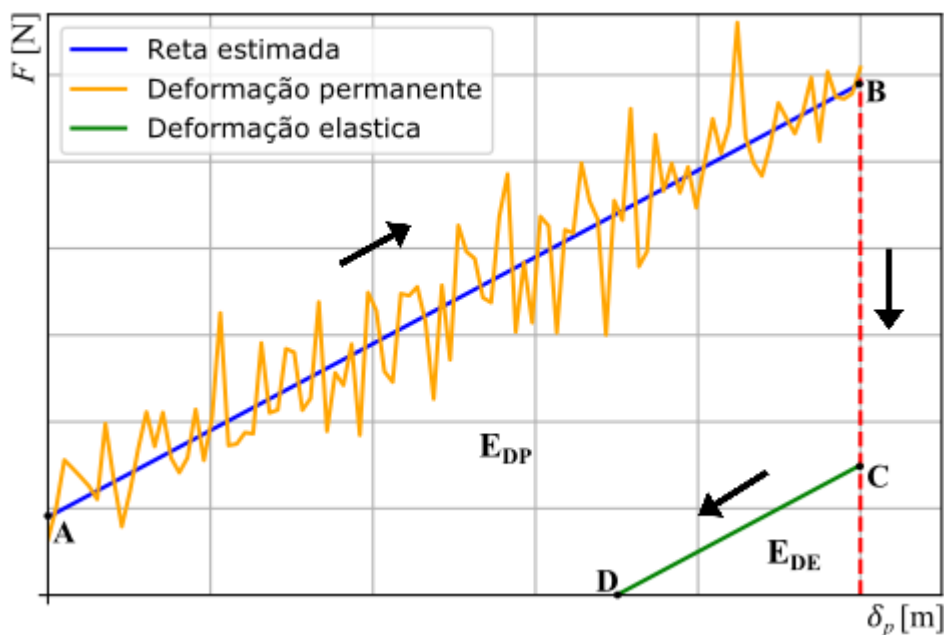


Figura 19 – Análise de energia no momento do impacto e regiões correspondentes à energia de deformação permanente e elástica.

# 3 EQUACIONAMENTO DA VELOCIDADE DE DANOS

A velocidade de danos é uma velocidade que é obtida em relação aos danos (deformação) causados no veículo decorrentes do impacto, a deformação causada na estrutura do veículo está associada à energia dissipada durante a colisão. Para se obter a velocidade de danos, considera-se que o veículo possua energia cinética decorrente de sua velocidade, e que tal energia é conservada [Silva 2014].

Fazendo uma análise da velocidade do veículo a partir do princípio da conservação de energia mecânica, temos que para se obter a energia inicialmente antes da colisão  $E_i$  considera-se que, o veículo está com uma certa velocidade e possua uma determinada quantidade de energia, expressa pela equação 3.1 sendo:

$$E_i = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

sendo  $m$  a massa do veículo e  $v$  a velocidade imediatamente antes do impacto.

Para determinar a energia imediatamente após colisão  $E_f$ , considera-se que após o impacto o veículo esteja absolutamente parado, portanto sua velocidade é zero, resultando na energia final sendo nula, expresso pela equação 3.2.

$$E_f = \frac{1}{2}mv^2 = 0 \quad (3.2)$$

A diferença de energia  $E_d$  é obtida através da diferença entre a energia inicial antes da colisão e final após a colisão do veículo, essa energia resulta em danos na estrutura do veículo, expressa pela equação 3.3.

$$E_d = E_i - E_f \quad (3.3)$$

A partir da equação genérica do princípio de conservação da energia mecânica, temos a equação 3.4 sendo:

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.4)$$

Isolando a velocidade  $v$  da equação 3.4 e considerando  $E_m = E_d$ , por convenção

$v = v_d$  obtemos então a velocidade de danos dada pela equação 3.5.

$$v_d = \sqrt{\frac{2E_d}{m}} \quad (3.5)$$

A velocidade de danos  $v_d$  é uma velocidade de referência para avaliar as características de danos estruturais do veículo em relação a sua velocidade, ou seja para cada velocidade de danos nota-se diferentes danos na estrutura do veículo [Silva 2014]. Para se obter a certeza que a velocidade  $v_d$  refere-se realmente as avarias encontradas no veículo, é preciso comparar tal velocidade com os danos encontrados em sua estrutura.

Com base na referência usual utilizada pelos peritos de acidente de trânsito, com finalidade de avaliar a velocidade  $v_d$  e comparar com as avarias existentes no veículo, essa comparação é feita de modo genérico para os modelos dos veículos e seus resultados são exibidos em forma de tabela, sendo classificados pelo tipo de avaria em função da velocidade de dano, como mostra a tabela 01 [Silva 2014].

<b>Tipo de Avaria</b>	<b>Vel. dano [km/h]</b>
Entortar pára-choque	05
Quebrar pára-choque	10
Quebrar pára-choque e grade do radiador	15/20
Quebras pára-choque, faróis, afundar grade massar capô e deformar lateria anterior	20/30
Quebrar pára-choque, faróis, afundar grade, deformar lateria anterior até escontar ao motor sem desloca-lo	30/40
Quebrar pára-choque, faróis, afundar grade, deformar lateria anterior até escontar ao motor sem desloca-lo e deformar suspensão	40/50
Afundar grade do radiador mais colmeia	40/45
Arrancar suspensão	40/45
Arrancar roda diretriz	40/45
Partir longarina	50/60
Arrancar roda motriz	50/60
Arrancar motor dos calços ou deslocar motor	60/70

Tabela 1 – Classificação do tipo de avaria estrutural do veículo em função da velocidade de danos [Silva 2014].

A tabela 01 é utilizada como uma contra prova, ou seja após o perito estar em posse da velocidade danos e coletado todas as características das avarias estruturais do veículo, compara-se tais dados com a tabela 01, se tanto as avarias como a velocidade de danos estiverem de acordo com a tabela, ou contenha dados próximos, pode-se considerar a velocidade de danos correta, ou seja dentro do esperado.

Após confirmada a associação da velocidade de danos  $v_d$  com as avarias encontradas na estrutura do veículo, pode-se então classificar o grau do acidente de trânsito, seguindo



a referência mostrada na tabela 02.

<b>Intensidade das Avarias</b>	<b>Velocidade de dano [km/h]</b>
Leve	Até 20
Média	20 a 40
Grave	40 a 60
Gravíssima	Acima de 60

Tabela 2 – Classificação do grau do acidente de trânsito [Silva 2014].

A tabela 02 refere-se à classificação do grau do acidente, esse dado é muito importante, pois, está associado a gravidade do acidente de trânsito, sendo levado em consideração para levantar culpados e aplicar punições [Almeida 2011].

## 4 ESTUDO DE CASO

Existem vários casos possíveis de acidentes de trânsito, sendo todos classificados segundo o tipo de impacto e suas condições. Considera-se nesse trabalho que motorista causador do impacto (acidente) não teve tempo de reação, ou seja, não teve tempo suficiente de acionar os freios ou de mudar a direção do veículo tentando evitar o impacto. Para o caso do impacto lateral, pode-se considerar a hipótese que o motorista tenha um mínimo tempo de reação para tentar mudar a direção do veículo, já que o ensaio de impacto lateral pode se encaixar nesse acontecimento.

### 4.1 Características de identificação do acidente de trânsito em barreira fixa ou móvel

Os critérios para identificação do acidente de impacto em barreira fixa ou móvel, são listados abaixo, sendo:

1. A deformação do veículo pode ser na parte frontal, lateral ou traseira;

No caso do impacto frontal, a barreira fixa pode ser um objeto fixo ou veículo parado, a deformação nesse caso está na parte frontal do veículo causador do impacto. Para o caso do impacto lateral ou traseiro, o veículo que recebe o impacto que será analisado, e o veículo causador do impacto é considerado a barreira móvel.

2. No caso do impacto frontal, a barreira fixa não pode ser transpassada (o veículo causador do acidente não perfura ou atravessa a barreira fixa);

Para o caso do impacto lateral ou traseiro, a barreira móvel não perfura ou atravessa o veículo que recebe o impacto.

3. No caso do impacto frontal, a barreira fixa não pode ser arrastada (é um objeto/veículo com massa muito superior à do veículo causador do acidente e o mesmo não consegue move-lo na mesma direção que seu deslocamento);

O mesmo ocorre para o caso do acidente lateral ou traseiro, a barreira móvel não arrasta o veículo que recebe o impacto;

4. No caso do impacto frontal a barreira fixa não pode ser arrancada (objeto está fixo);

5. No caso de a barreira fixa ser um caminhão, carreta, maquinário agrícola, maquinário de construção civil ou semelhante, o mesmo deve estar em velocidade muito baixa.

Ex.: Em uma subida ou cruzamento que o veículo esteja iniciando o movimento e/ou velocidade muito baixa, ou semelhante.

Para o caso de colisões frontais ou traseiras onde não existe uma barreira fixa, ainda é possível se considerar a mesma análise apresentada no trabalho, porém, adotando como referência a velocidade relativa de impacto, ou seja, o módulo da subtração entre as velocidades dos dois veículos envolvidos.

#### 4.1.1 Estudo de caso: Etapas de como proceder em uma análise pericial para os casos de acidente de impacto frontal ou lateral

**Passo 1:** Obter os dados do veículo impactado.

1. Coletar a deformação permanente da estrutura do veículo impactado (causador do acidente).

A coleta desse dado é baseada no método de fotografar o veículo deformado e comparar suas dimensões com um veículo idêntico em perfeito estado. A fotografia deve ser capturada a uma altura que enquadre todo o veículo e a câmera fotográfica deve ser posicionada no ponto central superior do veículo (centro de massa). Para realizar a comparação as imagens dos dois veículos devem estar nas mesmas dimensões e escala.

Deve-se medir várias partes da região que foi deformada pelo impacto e calcular a média aritmética desses valores. Obtendo assim a deformação permanente da estrutura do veículo.

A figura 20 mostra o ponto central do veículo (em preto e branco) que demarca a posição que a câmera deve permanecer durante a captura da fotografia. Na parte frontal do veículo, os pontos  $C_1$  e  $C_6$  em vermelho, indicam o início e o fim da região de deformação. Porém o ponto  $C_1$  não deve entrar no cálculo da deformação permanente, ou seja na média aritmética, pois o ponto não foi descolado em comparação à estrutura perfeita (sem deformação) do veículo idêntico. Porém o próximo ponto após o ponto  $C_1$  pode ser incluso no cálculo da deformação permanente da estrutura do veículo.

O mesmo ocorre para a parte lateral do veículo, porém os pontos  $C_1$  e  $C_6$  não devem entrar no cálculo da deformação permanente, pois, esses pontos não foram deslocados em comparação à estrutura perfeita (sem deformação) do veículo idêntico, e os próximos pontos entre os pontos  $C_1$  e  $C_6$  podem ser inclusos no cálculo da deformação permanente da estrutura do veículo.

Considere que o veículo CITROEN C4 – versão sem teto solar e barras de teto, cujo os parâmetros geométricos são dados a seguir:

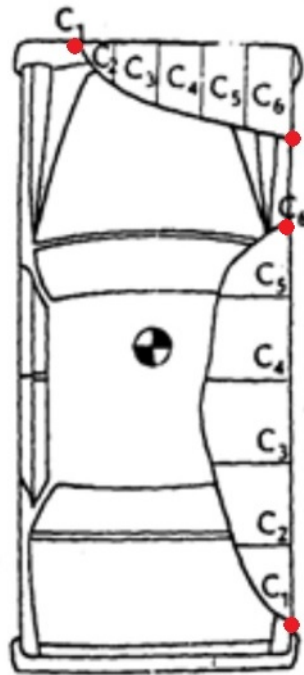


Figura 20 – Demarcação das regiões deformadas, partes dessas regiões a serem medidas e ponto central do veículo [Ribeiro 2014]

- $m=1177,5$  kg
- $L=1,714$  m
- $C=4,170$  m

Se envolvendo em um acidente de trânsito de impacto frontal ou lateral, a vista superior do mesmo é mostrada na figura 21, esse automóvel é o veículo de referência e em perfeito estado, ou seja sem deformação.

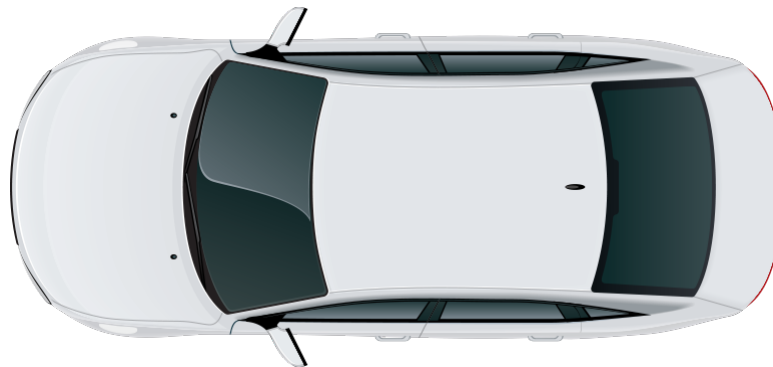


Figura 21 – CITROEN C4, veículo de referência em perfeito estado (sem deformação) [NHTSA FMVSS-214]

Após a ocorrência do impacto frontal ou lateral, resulta então na deformação estrutural do veículo, que é mostrado na figura 22, esse automóvel é do mesmo modelo e ano de fabricação do veículo da figura 21.

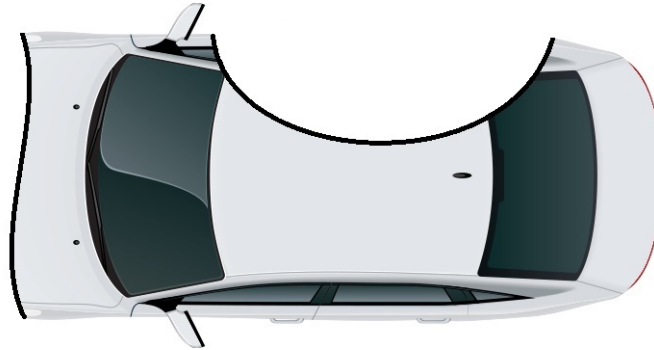


Figura 22 – CITROEN C4 deformado após impacto.

Portanto, pode-se comparar a dimensão estrutural do veículo de referência com a estrutura do veículo deformado, a diferença em suas dimensões resultará no dado de deformação permanente.

Para fazer a análise das imagens da estrutura do veículo de referência com a estrutura do veículo deformado, utiliza-se um software de edição de imagens. Para esse caso foi utilizado o Photoshop Online Photopea [Photopea]. As etapas a partir de agora serão realizadas dentro do software de edição de imagens.

O primeiro passo é editar as dimensões das imagens (se necessário) e modifica-las para estarem com as mesmas dimensões e na mesma escala, como mostra a figura 23.

O segundo passo é centralizar a imagem do veículo de referência no centro de referência (plano cartesiano) sugerido pelo software. Deve-se fazer o mesmo com a imagem do veículo deformado, dessa forma a imagem do veículo deformado cobrirá a imagem do veículo de referência, como mostra a figura 24.

O terceiro passo é reduzir o preenchimento ou a opacidade da imagem do veículo deformado, recomenda-se para uma melhor visualização um valor de 30% para opacidade ou preenchimento da imagem. Esse processo faz com que a imagem do veículo deformado fique transparente, dessa forma permite a imagem do veículo de referência ficar visível, mostrada na figura 25.

Observe que na figura 25 pode ser feita uma demarcação da região deformada da imagem do veículo deformado em comparação com a imagem do veículo de referência. Essa demarcação é de grande importância, pois a partir da definição da região deformada pode-se medir a deformação estrutural do veículo.

O quarto passo é medir a região deformada que é mostrado na figura 26. Primeiramente define-se o início e o fim da região deformada, sendo os pontos em vermelho  $C_1$

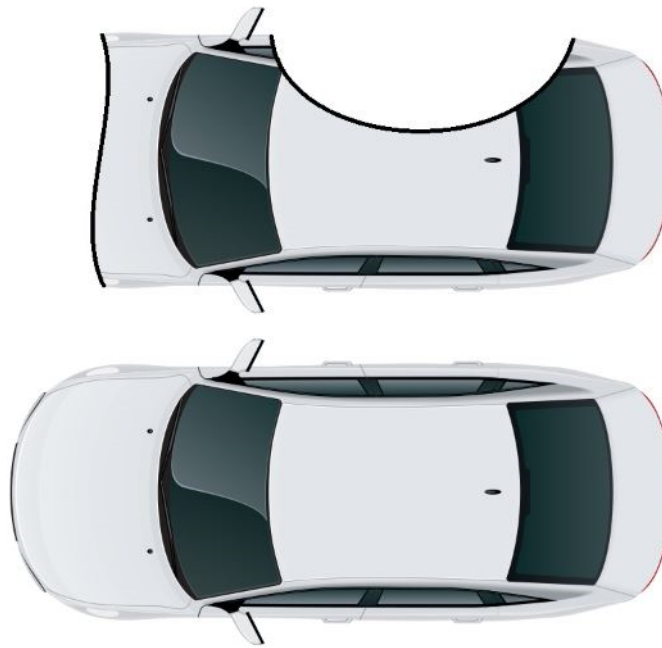


Figura 23 – Imagens dos veículos de referência e veículo deformado com as mesmas dimensões e escala.

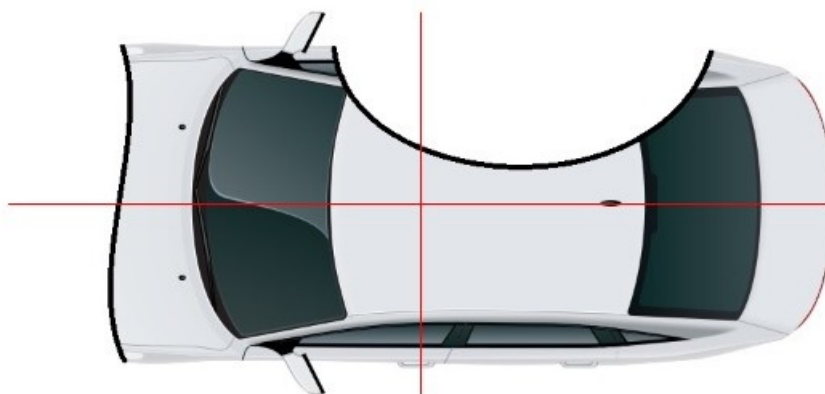


Figura 24 – Imagem do veículo deformado no centro de referência sugerida pelo software e sobreposta a imagem do veículo de referência (não deformado).

e  $C_9$  para a parte frontal e  $C_1$  e  $C_{10}$  para a parte lateral. Observando a região frontal e lateral do veículo, temos um exemplo de como é feita a distribuição das retas que medem a deformação estrutural do mesmo. Para melhor visualização da região deformada, é possível traçar uma linha contornando a região deformada com referência à estrutura do veículo em perfeito estado, mostrado na região lateral do veículo da figura 24, facilitando a construção das retas que medem a deformação.

O quinto passo é calcular a média aritmética dos valores de  $C$ , obtendo assim a deformação permanente da estrutura do veículo, dada pela equação 4.1. Sendo  $N$  o número

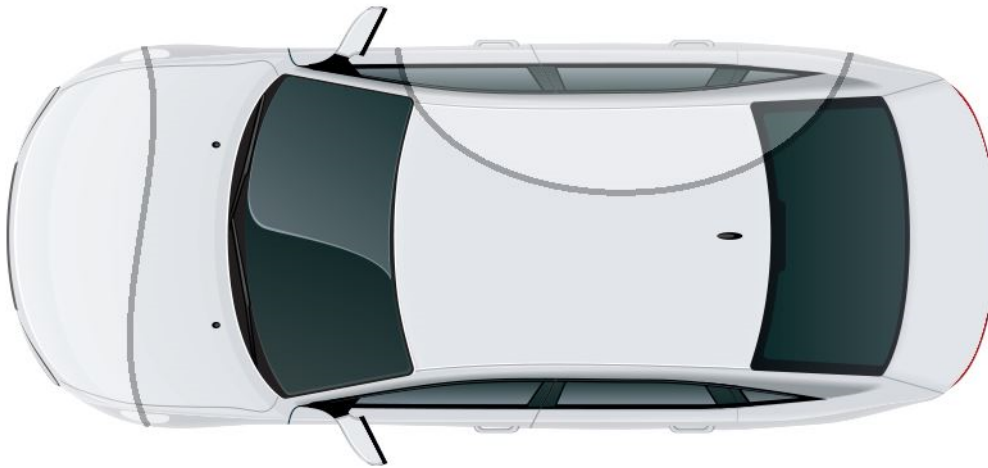


Figura 25 – Visualização da imagem do veículo de referencia a partir da redução da opacidade da imagem do veículo deformado.

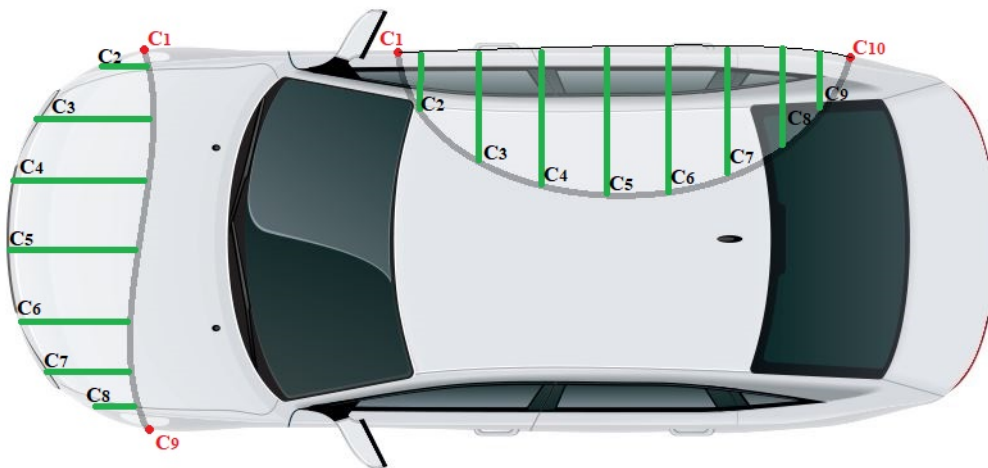


Figura 26 – Exemplo da distribuição das retas que medem a deformação na estrutura do veículo e contorno da região lateral deformada visando melhor visualização na construção das retas.

de pontos medidos de deformação.

$$\delta_p = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N}{N} \quad (4.1)$$

Considere a região de impacto frontal, cujo os valores de  $C$  são dados a seguir:

$$C_1 = 0,587 \text{ m}, C_2 = 0,632 \text{ m}, C_3 = 0,693 \text{ m}, C_4 = 0,744 \text{ m}, C_5 = 0,751 \text{ m}, C_6 = 0,742 \text{ m}, \\ C_7 = 0,672 \text{ m}, C_8 = 0,669 \text{ m}, C_9 = 0,662 \text{ m}, C_{10} = 0,586 \text{ m}.$$

Calculando a deformação permanente pela equação 4.1, temos que:

$$\delta_p = 0,674m \quad (4.2)$$

**Passo 2:** Determinar os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ .

Os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  podem ser obtidos por dois métodos distintos, tanto pelo método matemático apresentado na seção 2.5.1 utilizando os coeficientes hipotéticos considerando uma certa margem de erro hipotética, quanto pelo método das tabelas apresentado na seção 2.5.3 em função das características geométricas do veículo.

Segue-se a seguinte ordem de prioridade: Tenta-se calcular os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  através do método apresentado na seção 2.5.3, caso não seja possível os coeficientes devem ser obtidos através do método matemático da seção 2.5.1.

Prioridade 01 – Utilizar a tabela 03 disponível no apêndice A para calcular os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ , esta tabela está em função de alguns parâmetros do veículo, como marca e modelo.

Dados obtidos através da tabela 03, disponível no apêndice A.

Por questões de padronização de unidades, antes de realizar a coleta de dados, multiplicar o coeficiente  $A$  pela largura da região deformada  $L$ .

Ver Tabela 03, apêndice A, Citroen C4 2010.

$$A=79553 [N/m^2]$$

$$L=1,342 [m]$$

$$A = LA \quad (4.3)$$

$$B=1429865 [N/m^2]$$

$$A=106760,126 [N/m]$$

Considerando o comprimento da região deformada sendo  $l_d=1,714$  m.

Utilizando as equações 2.20 e 2.21 para calcular os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ , temos que:

$$b_0 = 3,89 [m/s]$$

$$b_1 = 39,9 [1/s]$$

Prioridade 02 - Utilizar a tabela 04 disponível no apêndice A para calcular o coeficiente  $b_0$ , esta tabela está em função da localização do impacto do veículo.

Utilizando a tabela 04, disponível no apêndice A, obtemos o valor do dado  $b_0$ , sendo:



$$b_0 = 1,78 \text{ [m/s]}$$

Considerando os dados A e B coletados pelo método da prioridade 1, e utilizando a equação 2.21, obtemos o valor do dado  $b_1$ , sendo:

$$b_1 = 45,62 \text{ [1/s]}$$

**Passo 3:** Estimar a velocidade imediatamente antes do impacto.

Utilizando a equação 2.10 pode-se calcular a velocidade imediatamente antes do impacto.

Para o método da prioridade 1, temos:

$$v = 30,79 \text{ [m/s]}$$

ou

$$v = 110,84 \text{ [km/h]}$$

Para o método da prioridade 2, temos:

$$v = 32,53 \text{ [m/s]}$$

ou

$$v = 117,11 \text{ [km/h]}$$

para o método matemático aplicado a confiabilidade de dados que gerou uma margem de erro hipotética, demonstrada no tópico 2.5.1, temos que:

$$b_{0,med} = 4,23 \text{ [m/s]}$$

$$b_{1,med} = 39,67 \text{ [1/s]}$$

Sendo a velocidade:

$$v_{med} = 30,97 \text{ [m/s]}$$

ou

$$v_{med} = 111,15 \text{ [kh/h]}$$

**Passo 4:** Calcular a velocidade de danos.

Calcula-se então a velocidade de danos  $v_d$ , que foi apresentada na seção 3.0.

Calculando a energia cinética do veículo antes da colisão, dada pela equação 3.1, temos:

$$E_i = 564694,205 \text{ [J]}$$

Como a energia imediatamente após colisão  $E_f=0$ , a diferença de energia  $E_d$ , é dada por:

$$E_d = 564694,205 \text{ [J]}$$

Temos então a velocidade de danos  $v_d$ , dada pela equação 3.5, sendo:

$$v_d = 30,97 \text{ [m/s]}$$

ou

$$v_d = 111,5 \text{ [km/h]}$$

**Passo 5:** Realizar a classificação do grau de gravidade do acidente de trânsito.

Através da tabela 01 compreende-se que o veículo apresenta profundas marcas de avarias, resultando da alta velocidade de danos. Já para a tabela 02 conclui-se que o acidente de trânsito se classifica como gravíssimo, ou seja a velocidade de danos está acima de 60 [km/h].

# 5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o método matemático apresentado para calcular a velocidade imediatamente antes do impacto frontal ou lateral está de acordo com o esperado, pois a velocidade  $v$  obtida pelo método da prioridade 1 mostra um valor próximo da velocidade  $v_{med}$  calcula através do método matemático e com base em uma margem de erro hipotética dos dados. É possível notar uma diferença considerável na velocidade obtidas pelos métodos da prioridade 1 e 2, ou seja é muito importante seguir a ordem de prioridade dos métodos para calcular tal velocidade. A  $v_{med}$  é um valor de confiança em quesito de dúvidas em relação aos métodos da prioridade 1 e 2, o perito em acidentes de trânsito pode concluir que o método para se considerar a velocidade  $v$  seria o método da prioridade 1, pois os valores de  $v$  da prioridade 1 e  $v_{med}$  estão mais próximos quando comparados com o método da prioridade 2. E por fim, caso o perito não tenha acesso a nenhum dos dados para executar o método da prioridade 1 e 2 ou quando os métodos apresentarem valores discrepantes em relação a realidade, deve-se considerar a velocidade imediatamente antes do impacto obtida pelo método matemático  $v_{med}$ .

## 5.1 Trabalhos futuros

- Uma proposta para realização de trabalhos futuros seria uma simulação pratica de deformação estrutural em uma lata de alumínio, utilizando uma máquina de ensaio charpy com adequação ao martelo (com sua face de impacto em formato quadrado/retangular), fazendo com que o martelo se impacta contra uma lata de alumínio variando o ângulo de soltura do mesmo e deformando a lata. Pode-se então medir a deformação na estrutura da lata e determinar sua rigidez estrutural através do equacionamento apresentado no tópico 2.4, e então comparar tal rigidez com uma possível rigidez teórica da estrutura da lata de alumínio. Através do equacionamento do Pêndulo Charpy, se obtém as demais variáveis necessárias para conclusão do estudo, como por exemplo velocidade e força de impacto do martelo sobre a lata;
- Outra forma de realizar essa simulação é utilizar uma massa (com sua face de impacto em formato quadrado/retangular) em queda livre com o intuito de deformar estruturalmente a lata, podendo variar a altura de soltura da massa. Utilizando equações que representam a queda livre é possível obter as demais variáveis para se concluir o estudo, como velocidade de impacto e através das Leis de Newton, determina-se a força de impacto entre massa e lata de alumínio. Através do tópico 2.4 pode-se obter a rigidez da lata e comparar os valores de rigidez obtidos com os

valores teóricos de referência;

O corpo de prova "lata de alumínio" pode ser substituído por outro objeto, como por exemplo: arame, barra metálica e etc. (Recomenda-se utilizar um corpo de prova cuja rigidez já é bem definida pela literatura);

- A partir do modelo matemático apresentado no tópico 2.5.1, é possível desenvolver um software tendo os dados de entrada a marca e modelo do veículo e os valores das deformações (valores de  $C$ ), gerando então uma faixa de valores  $b_{0,hip}$  e  $b_{1,hip}$  hipotéticos, aplicando regressão linear se obtêm os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  reais, estimando assim a velocidade imediatamente antes do impacto real;
- Desenvolver uma modelagem que considera a deformação da barreira fixa ou móvel, sendo a barreira fixa que o veículo foi colidido ou a barreira móvel colidindo contra a lateral do veículo, como por exemplo: a deformação de um poste;
- Avaliar e estimar o percentual da energia que está sendo desprezível na modelagem, como por exemplo: energia decorrente a frenagem e sistema de transmissão, energia em forma de calor e ruído e energia de deformação elástica;
- Avaliar os coeficientes  $b[0]$  e  $b[1]$  tabelados no formato adimensional, ou seja, trabalhar com os dados de forma universal;
- Desenvolver uma modelagem que considera a deformação que ocorre na direção perpendicular à velocidade do veículo, ou seja, deformação vertical.

# Referências

- ALMEIDA, L. L. d. Manual de perícias em acidentes de trânsito. *Campinas-SP: Millennium Editora, 504p*, 2011. Citado na página [44](#).
- ASSURANCE, S. Us department of transportation national highway traffic safety administration. 1990. Citado na página [28](#).
- ATUAÇÃO-NHTSA,2022. Citado 2 vezes nas páginas [24](#) e [25](#).
- BARREIRA de impacto frontal do ODB. Citado 2 vezes nas páginas [11](#) e [28](#).
- BATISTA, M. A note on linear force model in car accident reconstruction. *arXiv preprint physics/0511127*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas [30](#) e [32](#).
- GUIMARÃES, A. M. et al. Módulo de validação cruzada para treinamento de redes neurais artificiais com algoritmos backpropagation e resilient propagation. *Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, v. 14, n. 01, 2008. Citado na página [36](#).
- HOLLOWELL, W. T. et al. Updated review of potential test procedures for fmvss no. 208. *NHTSA Docket*, p. 6407–6, 1999. Citado na página [25](#).
- MESSRING,2022. Citado 2 vezes nas páginas [11](#) e [27](#).
- NHTSA. *Laboratory test procedure for FMVSS No. 214 ‘dynamic’, side impact protection*. [S.l.]: National Highway Traffic Safety Administration Washington, DC, 2006. Citado na página [27](#).
- NHTSA FMVSS-214. Citado 4 vezes nas páginas [11](#), [12](#), [26](#) e [47](#).
- NHTSA,2022. Citado na página [24](#).
- OGDEN, J. S. *Methods of investigating and reconstructing minor damage, low-velocity motor vehicle accidents*. Tese (Doutorado) — University of Colorado at Denver, 1995. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [61](#).
- PARLIAMENT, E. Directive 98/79/ec of the european parliament and of the council of 27 october 1998 on in vitro diagnostic medical devices. *Official J European Communities*, v. 331, p. 1–37, 1998. Citado na página [28](#).
- PHOTOPEA. Citado na página [48](#).
- RIBEIRO, R. A. d. C. *Modelação em reconstituição de acidentes*. Tese (Doutorado), 2014. Citado 11 vezes nas páginas [11](#), [12](#), [24](#), [25](#), [26](#), [29](#), [30](#), [32](#), [47](#), [59](#) e [60](#).
- RODRIGUES, J. M.; AZEVEDO, S. d.; RIBEIRO, L. C. d. Q. Mapa da motorização individual no brasil: relatório 2019. *Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2019. Citado 3 vezes nas páginas [11](#), [19](#) e [20](#).

- SANDNER, V.; ELLWAY, J.; RATINGEN, M. van. Euro ncap frontal impact working group report. In: *Proceedings of the 25th ESV Conference, paper*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 28.
- SEGURAS, V. Estatísticas nacionais de acidentes de trânsito. [http://www.viasseguras.com/layout/set/print/os\\_acidentes/estatisticas/estatisticas\\_nacionais](http://www.viasseguras.com/layout/set/print/os_acidentes/estatisticas/estatisticas_nacionais). Acesso em, v. 10, n. 01, p. 2014, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 11, 20 e 21.
- SILVA, E. R. da. *Análise do crescimento da motorização no Brasil e seus impactos na mobilidade urbana*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Citado na página 19.
- SILVA, L. C. A mecânica newtoniana aplicada na dinâmica dos acidentes de trânsito rodoviário-um suporte para decisões forenses. Universidade Federal de Uberlândia, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 13, 42, 43 e 44.
- THOMAS, P. Crash involvement risks of cars with electronic stability control systems in great britain. *International Journal of Vehicle Safety*, Inderscience Publishers, v. 1, n. 4, p. 267–281, 2006. Citado na página 27.
- ZERO, I. P. O. V. Euro ncap 2025 roadmap. 2015. Citado na página 27.

# A Apendice 1

## A.1 Tabelas de dimensões e coeficientes obtidos através do ensaio de "*crash test*" realizados pela NHTSA utilizando os protocolos da Euro NCAP.

Para a Tabela 03 com seus respectivos dados, deve-se por questões de padronização de unidades, antes de realizar a coleta de dados, multiplicar o coeficiente  $A$  pela largura da região deformada  $L$ .

Marca	Modelo	Ano teste	L deformação mm	C <sub>med</sub> m	b1 (1/s)	A (N/m <sup>2</sup> )	B (N/m <sup>2</sup> )
ALFA ROMEO	MiTo	2008	1291	0,70	22,3	44529	447283
ALFA ROMEO	Giulietta	2010	1349	0,48	32,5	71471	1047736
AUDI	A3	2012	1333	0,56	27,8	57121	714452
AUDI	A1	2010	1062	0,49	31,7	73798	1052513
AUDI	A6	2004	1391	0,85	18,4	45200	374496
AUDI	A6	2011	1406	0,64	24,4	63520	697360
BMW	1series	2004	1313	0,49	31,7	66772	951951
BMW	1series	2012	1324	0,62	25,1	57473	649979
BMW	5series	2004	1385	0,82	18,9	47272	402416
CITROEN	DS4	2011	1358	0,55	28,1	55320	699545
CITROEN	DS5	2011	1403	0,63	24,6	59646	662054
CITROEN	C5	2009	1389	0,79	19,6	50384	444929
CITROEN	C4	2010	1342	0,39	39,9	79553	1429865
CITROEN	DS3	2009	1286	0,52	30,0	55713	753565
CITROEN	C5	2004	1328	0,83	18,8	46670	394278
FIAT	GrandePunto	2005	1232	0,51	30,4	51414	703105
FIAT	Panda	2011	1265	0,74	21,0	39595	374054
FIAT	500	2007	1220	0,46	33,8	57233	872059
FIAT	Seicento	2000	1131	0,71	22,0	32557	322613
FIAT	Brava	1998	1313	0,59	26,6	48437	580138
FIAT	Punto	1997	1219	0,59	26,3	41534	492604
FORD	Fiesta	2012	1292	0,50	30,8	58255	808467
KIA	Cee'd	2007	1343	0,58	26,8	54720	660984
KIA	Cee'd	2012	1335	0,58	26,9	56557	684951
KIA	Picanto	2011	1196	0,52	29,8	49485	664112
LANCIA	Delta	2008	1348	0,69	22,7	52620	537013
MAZDA	Mazda2	2007	1271	0,70	22,1	38364	381541
MERCEDES	A-Class	2012	1335	0,59	26,4	57840	686530
OPEL	Adam	2013	1290	0,56	27,9	51232	643865

Figura 27 – Tabela 3 - Dados coletados do ensaio do "crash test" realizados pela NHTSA utilizando o protocolo Euro NCAP, constando marca e modelo do veículo, ano do teste, largura da deformação  $L$ , profundidade da deformação  $C_{med}$  e coeficientes. Parte 01 [Ribeiro 2014].



OPEL	Corsa	1997	1208	0,60	26,0	41753	488700
OPEL	Corsa	2006	1303	0,54	28,6	52359	674115
OPEL	Insignia	2008	1392	0,71	22,0	53947	533759
OPEL	Astra	2009	1361	0,72	21,5	46277	448545
OPEL	Vectra	1997	1275	0,73	21,2	47929	457154
OPEL	Omega	1998	1339	0,60	26,1	63054	742252
PEUGEOT	508	2011	1390	0,59	26,5	59403	708214
PEUGEOT	308	2013	1361	0,49	31,8	68827	986014
PEUGEOT	208	2012	1304	0,49	31,8	58929	844678
PEUGEOT	308	2009	1361	0,62	25,1	54134	612262
PEUGEOT	306	1998	1035	0,54	28,9	68871	897394
PEUGEOT	406	1997	1323	0,81	19,2	43839	378796
RENAULT	Twingo	2007	1230	0,62	25,1	43437	490509
RENAULT	Clio	2012	1299	0,63	24,7	45845	509632
RENAULT	Mégane	2014	1356	0,61	25,4	54093	619769
RENAULT	Laguna	1997	1314	0,49	31,8	70604	1012235
RENAULT	Mégane	1999	1274	0,77	20,2	37303	339213
SEAT	Ibiza	2011	1270	0,42	37,2	68168	1141305
SEAT	Leon	2012	1358	0,58	26,9	52971	641397
SEAT	Exeo	2010	1329	0,61	25,6	61106	704137
SKODA	Fabia	2000	1238	0,53	29,1	56234	737253
SKODA	Fabia	2007	1232	0,48	32,2	61284	889558
SKODA	Fabia	2014	1232	0,43	36,1	70455	1145314
SKODA	Rapid	2012	1280	0,73	21,4	40542	390416
SKODA	Superb	2008	1363	0,68	22,9	55474	571094
SKODA	Octavia	2004	1327	0,66	23,4	46403	489174
SKODA	Octavia	2013	1361	0,65	24,0	50053	542011
SUZUKI	SX4	2013	1324	0,59	26,3	49545	586072
SUZUKI	Splash	2008	1260	0,55	28,0	50903	643152
TOYOTA	Auris	2013	1320	0,58	26,8	59995	724858
VOLKSWAGEN	Polo	2009	1349	0,54	28,6	56718	730871
VOLKSWAGEN	Polo	1997	1262	0,57	27,1	49416	603911
VOLKSWAGEN	Scirocco	2009	1241	0,46	33,6	53460	808778
VOLKSWAGEN	Golf	2008	1358	0,61	25,4	53176	608494
VOLKSWAGEN	Passat	1997	1334	0,61	25,5	50474	579597
VOLSKWAGEN	Golf	2012	1349	0,58	26,9	53417	648267

Figura 28 – Tabela 3 - Dados coletados do ensaio do "crash test" realizados pela NHTSA utilizando o protocolo Euro NCAP, constando marca e modelo do veículo, ano do teste, largura da deformação  $L$ , profundidade da deformação  $C_{med}$  e coeficientes. Parte 02 [Ribeiro 2014].

Localização do Impacto no Veículo	$b_0$ , m/s (mph)
Frontal	1,78-2,23 m/s (4-5 mph)
Traseiro	1,78-2,23 m/s (4-5 mph)
Lateral	0,89-1,11 m/s (2-2,25 mph)

Figura 29 – Tabela 04 – Valores típicos de  $b_0$  em relação a posição do impacto [Ogden 1995].