

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INFLUÊNCIA DA ARFAGEM E MERGULHO EM ACIDENTES DE TRÂNSITO  
AUTOMOTIVO DO TIPO COLISÃO TRASEIRA

por

Rafael Ellwanger Pimentel

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

## CIP - Catalogação na Publicação

Pimentel, Rafael Ellwanger  
Influência da arfagem e mergulho em acidentes de  
trânsito automotivo do tipo colisão traseira / Rafael  
Ellwanger Pimentel. -- 2019.  
27 f.  
Orientador: Walter Jesus Paucar Casas.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. dinâmica veicular. 2. colisão. 3. sensibilidade.  
4. trânsito. I. Casas, Walter Jesus Paucar, orient.  
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rafael Ellwanger Pimentel

INFLUÊNCIA DA ARFAGEM E MERGULHO EM ACIDENTES DE TRÂNSITO  
AUTOMOTIVO DO TIPO COLISÃO TRASEIRA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Walter Jesus Paucar Casas

Comissão de Avaliação:

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, 16 de dezembro de 2019

Pimentel, Rafael Ellwanger. **Influência da arfagem e mergulho em acidentes de trânsito automotivo do tipo colisão traseira**. 2019. 27 f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## RESUMO

Os acidentes automotivos crescem em conjunto com o aumento do fluxo de veículos que adentram as rodovias. A simulação de acidentes por meio de *software* é uma ferramenta, que aliada à análise da dinâmica veicular ajuda a entender melhor as causas dos acidentes, e assim, apontar o possível responsável judicialmente. Entretanto, surgem dificuldades de interpretação do acidente que envolve colisão, frente às poucas marcas de frenagem existentes, e vestígios que apontem fielmente a dinâmica do ocorrido, sobrando muitas vezes apenas as deformações dos veículos como prova do ocorrido. Este trabalho objetiva reunir métodos de cálculos analítico e aproximações empíricas pelas características da deformação do impacto que auxiliem a contornar os problemas de interpretação do acidente. Esse trabalho propõe uma metodologia que emprega a influência do mergulho (*dive*) e da arfagem (*pitch*) em acidentes de trânsito veicular do tipo colisão traseira, adicionando esses movimentos na determinação da velocidade inicial do veículo colidente. Ainda, foi apresentado a sensibilidade desses movimentos em curvas de resposta em função de algumas características dinâmicas veiculares. Essa metodologia, que avalia melhor a resposta dinâmica do veículo, permitirá futuras simulações, e um melhor entendimento, visto que na grande maioria dos acidentes do tipo colisão traseira ocorre frenagem e a participação desses movimentos, que influenciam diretamente nas características do acidente.

PALAVRAS-CHAVE: dinâmica veicular, colisão, sensibilidade, trânsito.

Pimentel, Rafael Ellwanger. **Influence of pitch and dive in automotive rear end collision**, 2019, 27 p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## ABSTRACT

Automotive accidents are growing simultaneously with the high flow of vehicles entering the highways annually. The simulation of accidents through software is a tool that, combined with the analysis of vehicular dynamics helps to better understand the causes of accidents, and thus appoint the possible responsible person in court. However, difficulties appear in interpreting the collision accident due to the few existing braking marks, and traces that faithfully point out the dynamics of the event, often leaving only the deformations of the vehicles as evidence of the event. This work aims to acquire analytical calculation methods and empirical approximations by the characteristics of impact deformation that help to circumvent the problems of interpretation of the accident. This work proposes a methodology that employs the influence of dive and pitch in rear-end crashes, adding these movements to determine the initial speed of the crashing vehicle. Also, the sensitivity of these movements in response curves was presented as a function of some dynamic vehicle characteristics. This methodology, which better assesses the dynamic response of the vehicle, will allow future simulations and a better understanding, since in the vast majority of rear end crashes there is braking and the participation of these movements, which directly influence the accident characteristics.

**KEYWORDS:** vehicle dynamics, collision, sensitivity, traffic.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_x$	Aceleração do veículo	[m/s <sup>2</sup> ]
$b$	Distância do CG ao eixo dianteiro	[m]
$c$	Distância do CG ao eixo traseiro	[m]
$C$	Constante de amortecimento	[N/mm]
$D_a$	Força de arrasto aerodinâmico	[N]
$d_f$	Distância de frenagem	[m]
$E$	Energia cinética	[J]
$F_{xf}$	Força trativa dianteira	[N]
$F_{xr}$	Força trativa traseira	[N]
$h$	Altura do CG	[m]
$h_a$	Altura da força aerodinâmica aplicada	[m]
$K$	Constante da mola	[N/mm]
$K$	Coefficiente de atrito	[Adm]
$L$	Distância entre eixos	[m]
$m$	Massa do veículo	[kg]
$m_i$	Massa do componente	[kg]
$PF$	Porcentagem de frenagem	[%]
$R_{xf}$	Força de resistência ao rolamento dianteira	[N]
$R_{xr}$	Força de resistência ao rolamento traseira	[N]
$r$	Distância CG ao ponto do capo	[m]
$v$	Velocidade do veículo	[m/s]
$V_{CG}$	Velocidade do CG	[m/s]
$V_d$	Velocidade de dano	[m/s]
$V_i$	Velocidade inicial	[m/s]
$V_p$	Velocidade no ponto	[m/s]
$W$	Peso do veículo	[kg]
$W_f$	Peso dinâmico dianteiro	[N]
$W_{fs}$	Peso estático dianteiro	[N]
$W_r$	Peso dinâmico traseiro	[N]
$W_{rs}$	Peso estático traseiro	[N]
$x$	Flecha de deformação	[m]
$x_i$	Posição do componente	[m]
$\lambda$	Coefficiente de deformação linear	[kN/m]
$\theta$	Ângulo de arfagem	[rad]

## SUMÁRIO

ÍNDICE	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
3.1 Revisão Bibliográfica.....	1
3.2 Sistema de coordenadas de um veículo.....	3
3.3 Carga dinâmica e estática nos eixos.....	4
3.4 Arfagem e mergulho.....	5
3.5 Metodologia padrão da conservação de energia.....	7
3.6 Velocidade no ponto de impacto.....	7
3.7 Flecha de deformação.....	7
4 METODOLOGIA.....	8
4.1 Veículo estudado.....	8
4.2 Dados de entrada.....	9
4.3 Validação CarSim.....	9
4.4 Estudo de caso proposto.....	11
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	11
5.1 Resultado gráfico.....	11
5.2 Resultado estudo de caso proposto.....	13
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXO.....	16
APÊNDICE.....	17

## 1.INTRODUÇÃO

A dinâmica é a área da mecânica dos sólidos que estuda corpos sob aceleração. Dentro desta, se encontra a dinâmica veicular, que é responsável pelo estudo da aceleração e frenagem na superfície da estrada dos veículos automotivos. Com isso em mente, e pelo crescente número de veículos em circulação, conseqüentemente, cresce também o número de colisões dos mesmos. Segundo dados de 2016 da Organização Mundial de Saúde (OMS), o Brasil é o quarto colocado no ranking de mortes por causa de acidentes de trânsito nas Américas. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), classifica seus dados sobre acidentes em 15 categorias, e a maior parte deles são atribuídos à colisão traseira entre veículos, números esses que chegam à casa de quase 30%, mostrando a importância de estudos nesse caso. Os principais problemas técnicos relacionados a colisões entre veículos é a determinação da velocidade da colisão e a dinâmica da colisão, para que se busque uma melhor abordagem do ocorrido. Mesmo o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) apontar na maioria dos casos a culpabilidade do sinistro a quem colide na traseira, comprovações de velocidades iniciais fora das permitidas – maiores que as permitidas - podem reverter a causa. Estudos tem tido sucesso quanto ao modelamento de cálculos analíticos para determinação da velocidade inicial, aliados a *softwares* e características de deformação para que se entenda melhor a dinâmica veicular e a colisão, buscando-se um melhor apontamento dos responsáveis. Este trabalho propõe uma metodologia que analisa a dinâmica do movimento de arfagem e de mergulho do veículo por meio do programa comercial CarSim, cujos resultados são aproveitados junto aos métodos analíticos disponíveis na literatura para descoberta da velocidade inicial do veículo. Também, variam-se determinados parâmetros para determinação de superfícies de resposta da arfagem e mergulho do veículo estudado, possibilitando o melhor entendimento da influência desses parâmetros na colisão e tentando aproximar melhor os resultados com a realidade.

## 2.OBJETIVOS

Tem-se, como objetivo principal desse trabalho, entender a influência do ângulo de arfagem e do mergulho nos acidentes do tipo colisão veicular traseira utilizando ferramentas de dinâmica veicular, para que se busque resultados mais próximos da realidade, apontando de forma mais precisa a responsabilidade ou culpabilidade com base nos dados e vestígios. Como objetivos específicos definem-se: a) determinar uma metodologia para melhor avaliação da velocidade inicial do veículo em colisão, que sirva de entrada nas formulações existentes e usadas em perícias veiculares; e, b) avaliar a sensibilidade dos principais parâmetros que influenciam a resposta do mergulho e arfagem na dinâmica da colisão veicular traseira entre dois veículos. Com isso, procura-se uma melhor aproximação da velocidade real do veículo colidente com a calculada, dado esse muito importante em estudo de culpabilidade, definitivo na esfera judicial.

## 3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desenvolvendo uma metodologia de acidentes de trânsito, Almeida (2014), empregou um método de cálculo de velocidade inicial, incluindo também acidentes do tipo colisão traseira, onde métodos da conservação de energia como também, da conservação da



quantidade de movimento foram utilizados para buscar uma casuística e culpabilidade nos sinistros.

Com objetivo de avaliar a dinâmica veicular, Reza (2017), demonstra a distribuição de forças em eixos e aplica estudos de distribuição de frenagem, salientando que quanto maior a desaceleração proveniente, maior a transferência dinâmica e maior a força de frenagem na dianteira do veículo. Introduz conceitos de vibração e equacionamento da suspensão, como também otimização sobre os componentes de mola e amortecimento de suspensão.

Objetivando a análise de sistemas e subsistemas diretamente influentes na dinâmica veicular, Wong (2001) demonstrou um estudo sobre teoria de veículos terrestres onde aplicou estudos sobre pneus, freios e suspensão. Outro ponto que salienta, é sobre a distribuição de frenagem que, divergindo de padrões ideais, faz com que rodas dianteiras ou traseiras travem, o que imprime perda de estabilidade no veículo e possível aumento na distância de frenagem e não otimização do tempo de imobilização do mesmo.

No trabalho de Peruzzo (2016) se fez utilização do *software* CarSim na modelagem de um acidente veicular e obteve-se convergência com cálculos analíticos de dinâmica veicular. Para tanto, se desenvolveu um modelo de veículo no *software* citado com parâmetros dinâmicos e dimensões geométricas apresentadas pelo fabricante do veículo.

Irureta (1996) elencou diversos coeficientes de atrito entre pavimentos e diferentes tipos de veículos. Segundo o autor, um coeficiente de atrito médio entre um veículo de passeio e um asfalto novo, gira na casa dos 0,8, e pode chegar até 0,6 em condições de pavimento úmido.

Gillespie (1992) descreve os eixos e movimentos do veículo, como também, faz simplificações em modelos dos principais sistemas utilizados na dinâmica veicular, assim, demonstra, por exemplo, as equações das cargas estáticas e dinâmicas nos eixos de veículos do tipo estudado em questão no trabalho.

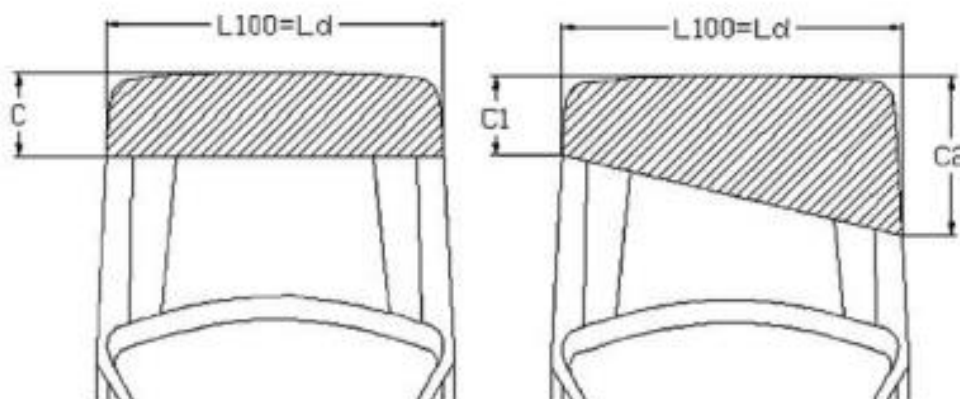
Empregando a técnica de fotogrametria na investigação de acidentes de trânsito, Du et al (2009) obtiveram dados para a reconstrução de acidente veicular. O método 3D é usado, com um sistema de referência, na avaliação da deformação do veículo, que pode ser visto na Figura 1.

Fig 1 – Sistema de referência e deformação do veículo, Du et al. (2009).



Vangi (2009) diz que os danos causados pelos acidentes podem ser aproximados por diversas geometrias, que em conjunto com os cálculos de Campbell (1974), possibilita calcular a energia dissipada durante a deformação. O procedimento pode ser visto na Figura 2, onde  $C$ ,  $C1$  e  $C2$  são parâmetros de profundidade para danos com secção linear e  $Ld$  é a largura dos danos, em mm.

Fig 2- Danos e suas características geométricas, Vangi (2009).



No estudo de Endo (2003) relaciona-se a avaria com a velocidade de dano para o cálculo teórico da conservação de energia, Tabela 1, onde Almeida (2014) emprega a base dos cálculos para a determinação da velocidade inicial, e compara com o método da conservação da quantidade de movimento.

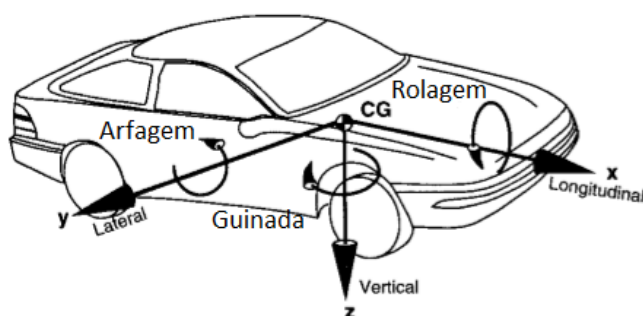
Tab 1 – Avarias e suas velocidades de dano, Endo (2003).

Avaria	Velocidade de dano (km/h)
Leve	Até 10
Média	20 a 40
Grave	40 a 60
Gravíssima	Acima de 60

### 3.2 SISTEMA DE COORDENADAS DE UM VEÍCULO

O sistema de coordenadas de um veículo, segundo Gillespie (1992) é associado a três eixos fixados ortogonalmente ao CG. Emprega-se então os eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , e com eles estão relacionados três ângulos: ângulo de rolagem, ângulo de arfagem e ângulo de guinada, respectivamente, como se observa na Figura 3.

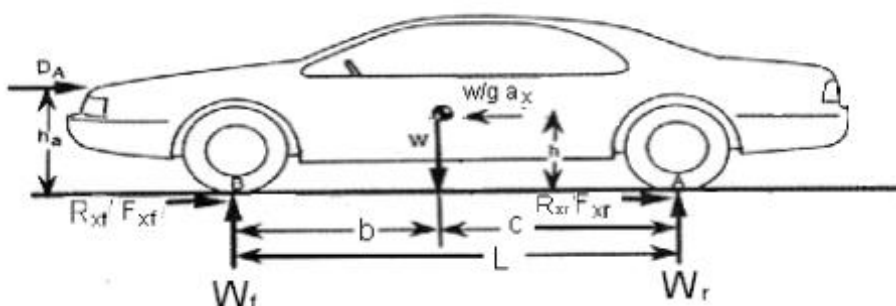
Fig 3 – Sistema de coordenadas SAE de um veículo, Gillespie (1992).



### 3.3 CARGA DINÂMICA E ESTÁTICA NOS EIXOS

Para se obter os carregamentos nos eixos dianteiro e traseiro, emprega-se o equacionamento de equilíbrio estático de um problema dinâmico, que incorpora os termos inerciais, seja da aceleração ou frenagem, conforme Figura 4.

Fig 4 – Diagrama de corpo livre de um veículo em frenagem, Gillespie (1992).



Desconsiderando-se a força aerodinâmica  $D_a$ , resolvendo-se o somatório de momentos nos pontos A e B, situados nas rodas traseira e dianteira, respectivamente, isolando-se as componentes de peso dinâmico dianteiro e traseiro, na frenagem, obtém-se as Equações 1 e 2.

$$W_f = W_{fs} + W \frac{a_x}{g} \frac{h}{L} \quad (1)$$

$$W_r = W_{rs} - W \frac{a_x}{g} \frac{h}{L} \quad (2)$$

Onde,  $W_f$  é o peso dinâmico nas rodas dianteiras e  $W_r$  é o peso dinâmico nas rodas traseiras, ambos em N. Ainda,  $a_x$  é a desaceleração do CG na direção  $x$ , em  $\frac{m}{s^2}$ . Por sua vez,

$R_{xf}$  e  $R_{xr}$  são forças de resistência ao rolamento dianteira e traseira, respectivamente, em N. Também,  $F_{xf}$  e  $F_{xr}$  são forças de frenagem, dianteira e traseira, respectivamente, em N.

Nota-se que a carga dinâmica na frente é acrescida ao peso estático com a transferência dinâmica na frenagem. Na traseira, o processo é oposto, subtraindo a parcela dinâmica no processo de frenagem. As Equações 3 e 4, são referentes as cargas estáticas do peso do veículo.

$$W_{fs} = W \frac{c}{L} \quad (3)$$

$$W_{rs} = W \frac{b}{L} \quad (4)$$

Lembra-se que,  $W_{fs}$  é a carga estática no eixo dianteiro, e  $W_{rs}$  a carga estática no eixo traseiro, ambas em N.

Nas Equações 5 e 6,  $c$  e  $b$ , são medidas geométricas referentes ao veículo, em m.

$$b = \frac{\sum X_i m_i}{\sum m_i} \quad (5)$$

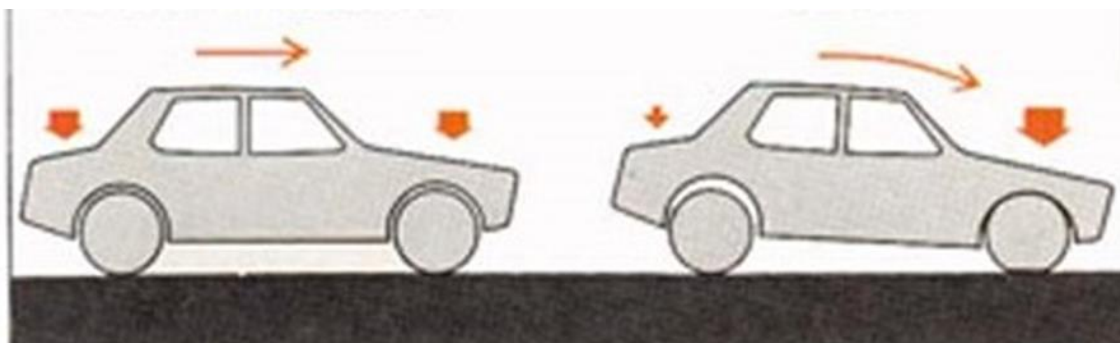
$$c = L - b \quad (6)$$

Onde,  $c$  é a distância do CG ao eixo traseiro e  $b$  é a distância do CG ao eixo dianteiro, ambas em m. Finalmente,  $h$  é a altura do CG.

### 3.4 ARFAGEM E MERGULHO

Arfagem é o ângulo com que a massa suspensa do veículo, ou sua carroceria, gira em torno do eixo transversal. O mergulho que a frente do veículo faz, tende a afundar a frente e defletir sua suspensão. Esses dois movimentos são vistos quando o veículo freia, na impressão de frenagem, pelo efeito da transferência dinâmica de carga, conforme Figura 5.

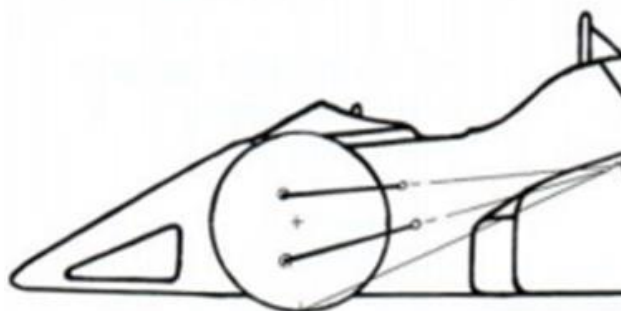
Fig 5 – Transferência dinâmica de carga com mergulho e arfagem.



Suspensões que evitam esses movimentos, denominadas *anti-dive*, não mudam a transferência de carga entre os eixos dianteiro e traseiro, a transferência de carga gerada pela frenagem, será função da distância entre eixos, da frenagem – ou desaceleração- da altura do CG e do seu peso, variáveis essas encontradas nas Equações 1 e 2. A desaceleração é

influenciada pela distribuição de frenagem, que, na maioria dos carros, flutua em uma faixa de 70% a 60% na dianteira. De fato, o que as suspensões *anti* - assim chamadas – influenciam, é quanto do carregamento que passará para a suspensão, modificando o movimento de arfagem e mergulho do veículo, como pode ser observada na Figura 6.

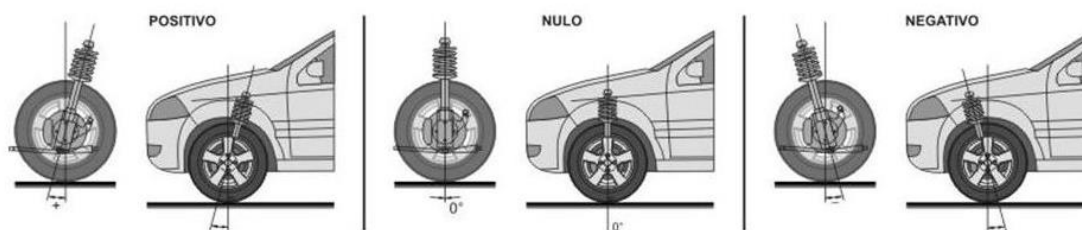
Fig 6 – Geometria *anti-dive*, Staniforth (2010), adaptado.



Em uma suspensão 0% *anti-dive*, toda a transferência de carga é transferida para as molas, amortecedor e seus componentes que irão defletir e afundar a frente do carro, no movimento de mergulho e arfagem. Já em uma suspensão 100% *anti-dive*, toda essa transferência será integralmente absorvida pelos braços da suspensão, não defletindo em nada a frente do veículo.

Uma das características da suspensão que tem influência direta nesse mergulho e arfagem, é o ângulo de Caster, que segundo a DIN70020, é a distância entre o ponto de contato pneu/pista e o ponto em que a linha de ação do pino mestre encontra o solo. Na Figura 7, encontram-se alguns tipos de configuração desse ângulo, sendo o Caster positivo, o que mais evita a arfagem e o mergulho, sendo empregada em algumas suspensões 100% *anti-dive*.

Fig 7 – Ângulo de caster.



### 3.5 METODOLOGIA PADRÃO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Um veículo que imprime velocidade tem vinculado ao movimento uma energia cinética atrelada. Em questão, um veículo que percorre um trecho em processo de desaceleração, todas as energias dissipadas no percurso, quando somadas, resultam na energia inicial, quando o

mesmo – veículo colidente -, encontrava-se animado com uma velocidade inicial. A Equação 7, determina essa energia cinética total  $E$ , em J.

$$E = \frac{mv_1^2}{2} \quad (7)$$

Onde  $m$  é a massa total do veículo em kg e  $v_1$  sua velocidade, em m/s.

A velocidade pós colisão – de ambos veículos -, da parcela da frenagem, segundo Almeida (2014), em m/s consegue-se pela Equação 8.

$$v = 15,946 \sqrt{Kd_f} \quad (8)$$

Sendo  $K$  o coeficiente de atrito entre pneu e asfalto. Ainda,  $d_f$  é a distância de frenagem, em m. A velocidade inicial, do veículo colidente, em m/s.

$$V_i = [v_1^2 + v^2]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

### 3.6 VELOCIDADE NO PONTO DE IMPACTO

Sabe-se que o veículo estudado pode ser reduzido em seu centro de gravidade. Diferentemente do CG, o para-choque do veículo tem uma velocidade diferente, fazendo a extensão do corpo rígido em 2D, enquadra-se na metodologia proposta. A Equação 10, expressa a velocidade do corpo no ponto de impacto na frente do capô,  $V_P$ , em m/s, que é diferente da velocidade do centro de gravidade, no momento da frenagem, influente no ponto de impacto oriunda da dinâmica de corpos rígidos.

$$V_P = (V_{CG} - \omega r \sin\theta)\mathbf{i} - (\omega r \cos\theta)\mathbf{j} \quad (10)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de arfagem em rad,  $\omega$  é a velocidade angular (do movimento de arfagem do veículo em torno do CG), em rad/s, e  $r$  é a distância do CG ao ponto do para-choque estudado, em m.

A velocidade no ponto de impacto, é atenuada pela componente horizontal, mas é positiva. Já a componente vertical, aparece no cálculo negativo, o que confirma que o movimento é para baixo, que converge com o mergulho e a arfagem em estudo.

### 3.7. FLECHA DE DEFORMAÇÃO

Segundo Almeida (2014), uma maneira de avaliar veículos acidentados seria relacionar estudos de *crash tests* a valores de referência que possibilitem a comparação numérica envolvendo massa, velocidade e deformação. Ainda, o autor considerou que a força que provoca a deformação é linear e proporcional à flecha de deformação  $x$ . Segundo a Equação 11, o coeficiente de deformação linear, em kN/m é dado, igualando o trabalho de deformação à energia cinética do veículo colidente antes do impacto.

$$\lambda = m \frac{V_p^2}{x^2} \quad (11)$$

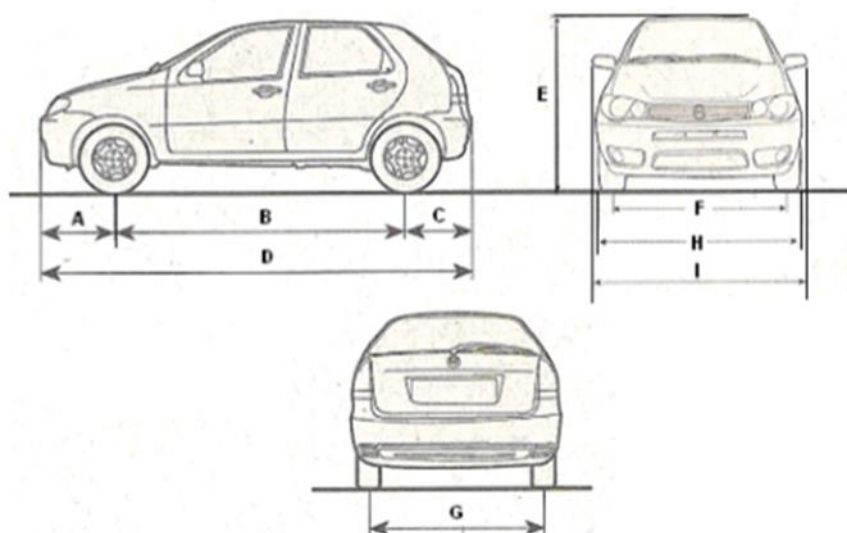
Sendo,  $m$  a massa do veículo em kg,  $V_p$  a velocidade no ponto de impacto em m/s, e  $x$  a flecha de deformação, em m, que é a distância máxima onde se observa deformação plástica no veículo, medida do ponto de impacto ao longo do chassi.

#### 4. METODOLOGIA

##### 4.1 VEÍCULO ESTUDADO

Estuda-se o comportamento dinâmico de um carro *hatchback*, comumente encontrado em rodovias do país. Conforme manual do veículo, as propriedades geométricas do mesmo são apresentadas na Figura 8 e Tabela 2, as quais serão utilizadas nas simulações dinâmicas do mesmo no *software* CarSim.

Fig 8 – Veículo tipo *hatchback*, Peruzzo (2016).



As características geométricas e dinâmicas do veículo estudado podem ser observadas na Tabela 2.

Tab 2 – Características do veículo estudado, Peruzzo (2016), adaptado.

Grandeza	Variável	Valor
Massa suspensa	-	880 kg
Massa não suspensa dianteira	-	25 kg
Massa não suspensa traseira	-	25 kg
Momento de inercia de rolagem	$I_{xx}$	$288 \text{ kg m}^2$
Momento de inercia de arfagem	$I_{yy}$	$1111 \text{ kg m}^2$
Momento de inercia de guinada	$I_{zz}$	$1111 \text{ kg m}^2$

Distância CG ao eixo dianteiro	<i>b</i>	0,937 m
Distância CG ao eixo traseiro	<i>c</i>	1,436 m
Posição vertical do CG	<i>h</i>	0,529 m
Eixo dianteiro ao extremo frontal	<i>A</i>	0,767 m
Distância entre eixos	<i>B</i>	2,373 m
Eixo traseiro ao extremo posterior	<i>C</i>	0,623 m
Comprimento total	<i>D</i>	3,763 m
Altura	<i>E</i>	1,440 m
Bitola eixo dianteiro	<i>F</i>	1,415 m
Bitola eixo traseiro	<i>G</i>	1,378 m
Largura do chassi	<i>H</i>	1,620 m
Largura do veículo	<i>I</i>	1,905 m

## 4.2 DADOS DE ENTRADA

O CarSim é um *software* de estudo sobre dinâmica veicular de código aberto, em muitos parâmetros. Com os dados apresentados na Tabela 2, dá-se as condições necessárias para que se simule o veículo na proposta necessária.

No trabalho, também se fez necessária a criação de pista, e de uma dinâmica de frenagem, para que se obtivessem os resultados esperados. A metodologia com o *software* em questão, foi imprimir os gráficos de ângulo de arfagem e deflexão do mergulho, com parâmetros sendo variados, a maioria deles de dois em dois para que se alcançasse os gráficos esperados.

Para tanto, deu-se de entrada dados como coeficiente de amortecimento do amortecedor, como também, constante de rigidez da mola, em alguns casos foram flutuados peso do veículo e, altura do CG. Ainda, mudou-se a distribuição da porcentagem de frenagem, alterando a eficiência de desaceleração. Ainda, empregou-se um ângulo de Caster padrão de 0 graus.

Como a resposta é dinâmica, variando-se os dados com o tempo, buscou-se o ponto em que esses efeitos eram máximos e que não eram influenciados por uma resposta transiente, pontos esses apontados pelo próprio programa.

## 4.3 VALIDAÇÃO CARSIM

Programas como o CarSim resolvem equações matemáticas aplicados a veículos. Essa solução é alcançada por métodos de integração numéricas.

Com as Equações 1 e 2, tem-se os resultados analíticos das cargas dinâmicas e estáticas do veículo, os quais são comparados com os da simulação, segundo Tabela 3.

Tab 3 - Forças obtidas no eixo analiticamente e na simulação.

	Carga Estática			Carga Dinâmica		
	Analítico	Simulação	Diferença (%)	Analítico	Simulação	Diferença (%)
Eixo Dianteiro	5714 [N]	5600 [N]	2,03	5900 [N]	6200 [N]	5,08
Eixo Traseiro	3902 [N]	4100 [N]	5,07	3721 [N]	3550 [N]	4,8



As Figuras 9 e 10 mostram os resultados apresentados pelo *software*, a diferença entre os resultados analíticos e por simulação são de até 5,08 % - como mostra a Tabela 3 -, a qual pode estar associada à simplificação do modelo analítico – unidimensional - se comparado com os diversos sistemas veiculares que estão embutidos na simulação do *software*.

Fig 9 - Simulação da resposta de carga dinâmica e estática dos pneus dianteiros.

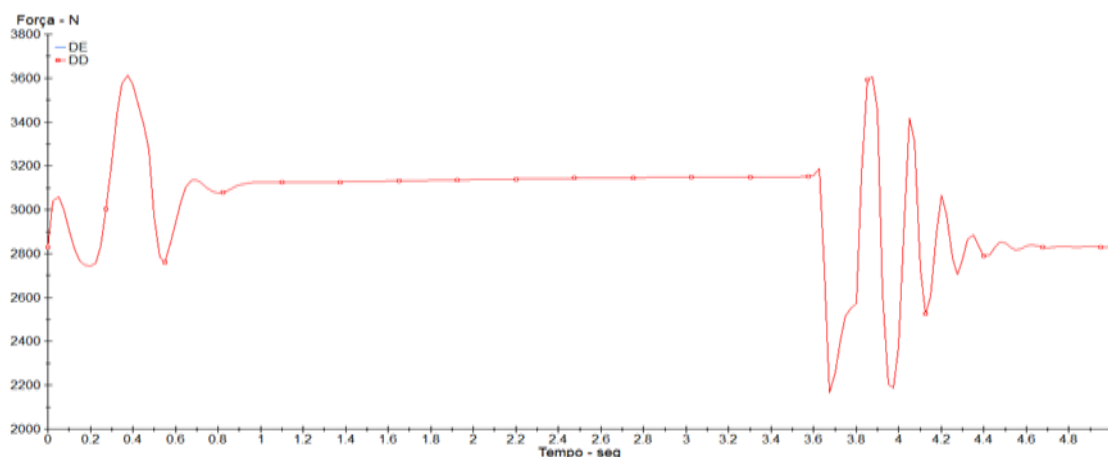
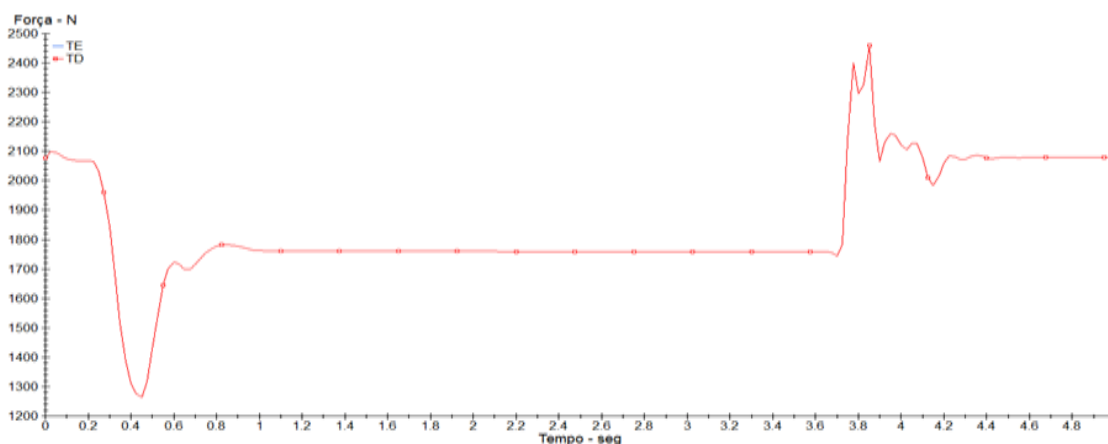


Fig 10 - Simulação da resposta de carga dinâmica e estática dos pneus traseiros.



Como o *software* imprime o resultado de cada roda, se multiplica por dois os resultados mostrados pelo gráfico para que então, possa se comparar com os obtidos com a teoria. No início da simulação, se tem uma flutuação dos resultados, isso se deve à resposta transiente no começo da simulação.

Ainda, a desaceleração aplicada foi de 0,85 g, e os gráficos plotados iniciam com uma zona transiente de instabilidade, até aproximadamente 1s, após, encontra-se em sua carga dinâmica e, ao final, após 4,6 s, o carro encontra-se parado, com seu peso estático sendo apresentado.

#### 4.4 ESTUDO DE CASO PROPOSTO

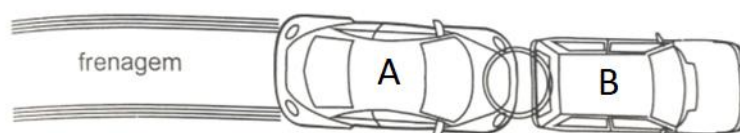
A metodologia proposta, emprega o efeito do mergulho e da arfagem provenientes da frenagem, inseridos na metodologia padrão de Almeida (2014).

Pretende-se simular a colisão traseira entre um veículo *B* parado, e um veículo *A* que chega com velocidade desconhecida. Após a colisão os veículos seguem desacoplados, com velocidades distintas.

O estudo proposto, é de um caso incluso nas superfícies de resposta, a serem discutidas na seção 5, em que, os resultados apresentam, um mergulho de 100 mm e uma arfagem de aproximadamente 8 graus. Usam-se, os outros parâmetros como considerados padrões através do *software*, pela condição ideal de um carro *hatchback* padrão. Outro ponto que se evidencia, são as marcas de frenagens deixadas pelo veículo colidente, de aproximadamente 15 m. Com a Figura 11, entende-se melhor a cena de colisão proposta. O coeficiente de atrito entre o asfalto e o pneu é adotado como igual a 0,8.

Já o dado do pós-colisão, é de que o veículo colidido seguiu 10 m imprimindo frenagem e o veículo colidente, 15 m. Esses dados, tanto do pós como do pré colisão, são essenciais para que se levante as informações necessárias para uma boa perícia.

Fig 11 – Cena da colisão proposta momento da colisão.



A metodologia consiste em somar todas as energias e atribuir a energia cinética do veículo colidente, visto que o veículo colidido encontra-se parado no momento do impacto. Com o emprego da Equação 8, se tem as velocidades do pós impacto de ambos os veículos. Ainda, cabe a escolha, com o emprego da Tabela 1, da energia atrelado a velocidade de dano dos veículos. Com a soma das energias referentes aos veículos, tanto por sua velocidade quanto pela velocidade de dano, com a Equação 7, se tem a energia total pré impacto, que frente ao veículo *B* estar parado, toda é atribuída ao veículo colidido, onde descobre-se sua velocidade no momento do impacto.

Ainda, como antes da colisão houve frenagem do veículo *A*, soma-se a parcela de velocidade proveniente da frenagem do mesmo antes da colisão, com a Equação 8 e então, empregando-se a Equação 9, encontra-se a velocidade inicial do veículo colidente no momento antes da frenagem, ao ter avistado o veículo *B* parado.

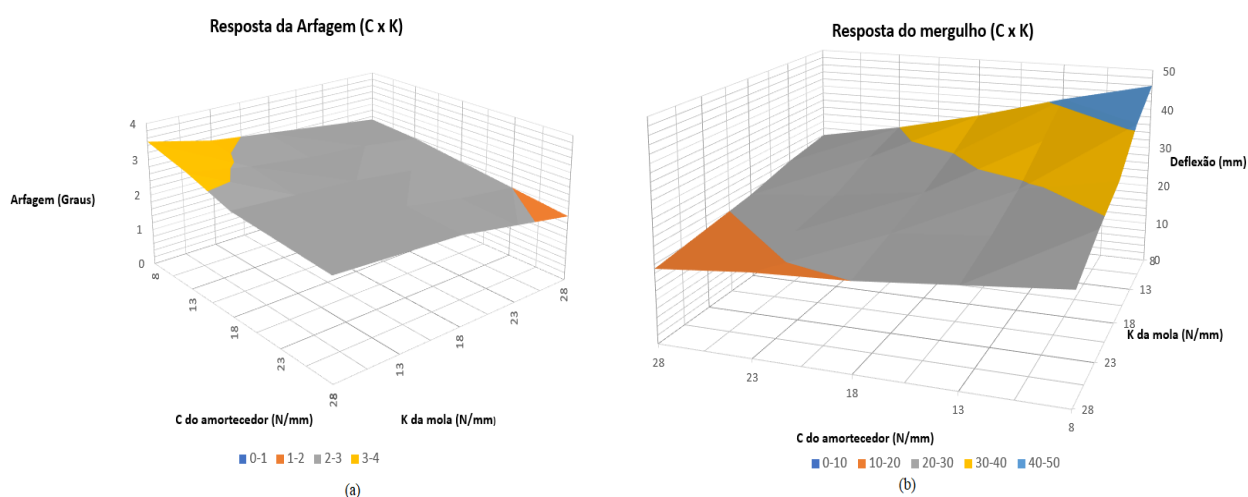
A metodologia proposta baseia-se na diferença de deformação apresentada pela arfagem e mergulho, onde emprega-se a Equação 10 e 11. Como a velocidade no ponto é menor que a do CG, logo apresenta uma menor deformação, através da Equação 11.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 5.1 RESULTADO GRÁFICO

As simulações resultaram em pares de gráficos de resposta em que, dois parâmetros alterados deram a resposta em graus para a arfagem e mm para o mergulho. A Figura. 12(a) e 12(b) apresentam os resultados em relação ao coeficiente de amortecimento *C* e rigidez da mola *K*.

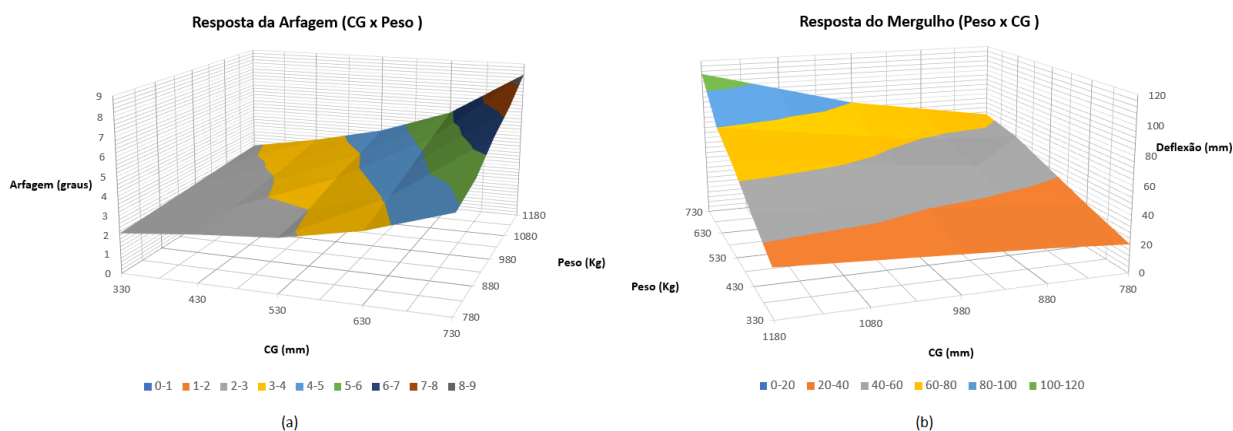
Fig 12 – Superfície de resposta do (a) arfagem e (b) mergulho, em função da variação dos coeficientes de amortecimento e rigidez.



Nota-se que a manutenção do sistema de suspensão mostra-se fundamental para o comportamento dinâmico esperado do veículo, uma vez que apresentam a influência direta nos movimentos estudados. A combinação simultânea de menores valores de rigidez da mola e do coeficiente de amortecimento elevam os valores de arfagem e mergulho.

Ainda, a Figura 13 apresenta a sensibilidade do mergulho e arfagem influenciada pelo CG e peso do veículo.

Fig 13 – Superfície de resposta do (a) arfagem e (b) mergulho, em função da variação do CG e do peso.

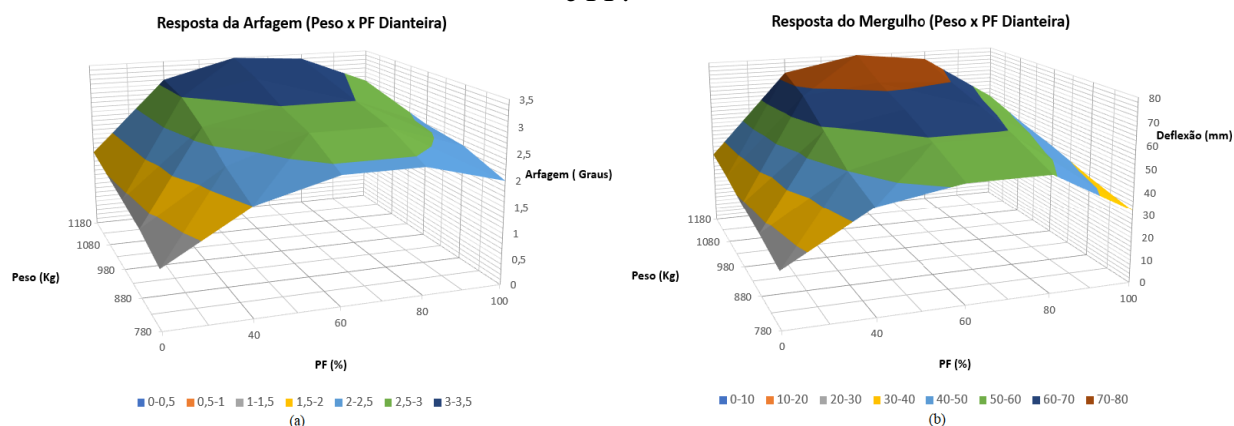


Na Figura 13(a), mostrou-se mais sensível os resultados com peso e CG maiores, o que pode resultar em um projeto de suspensão que não contempla - ou melhor- se espera essa

configuração. Um aumento de peso, que por excesso de pessoas ou de carga, mostrou-se não eficiente a suspensão nessas condições.

Além disso, a Figura 14 e Figura 15 mostram a Proporção de frenagem ( $PF$ ) com alguns parâmetros sendo variados, com o intuito de entender uma possível falta de manutenção e eficiência na distribuição de frenagem que influenciem os movimentos estudados. A Figura 14 (a) e Figura 14 (b) mostram a relação com o Peso.

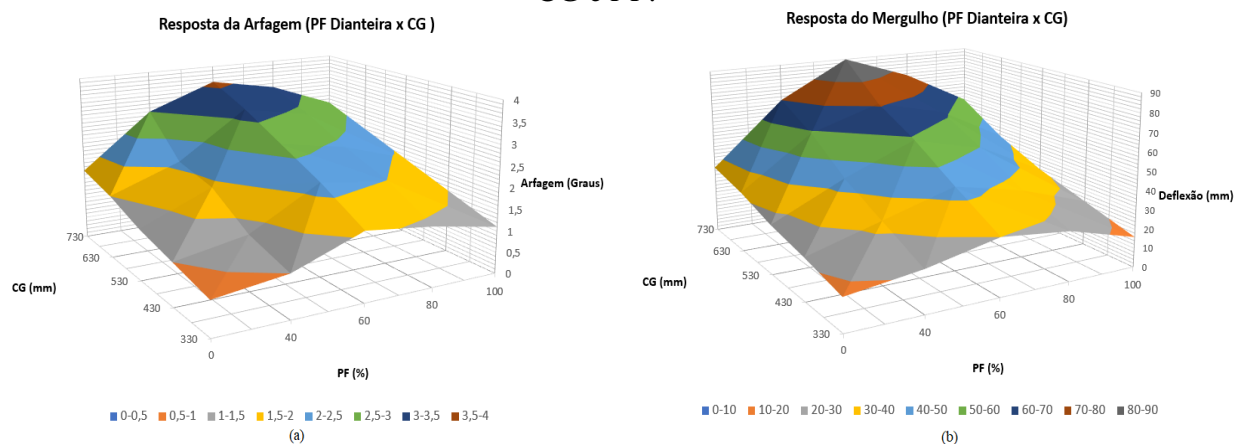
Fig 14 – Superfície de resposta do (a) arfagem e (b) mergulho, em função da variação do peso e  $PF$ .



A Figura 15, mostra a relação da  $PF$  com o CG, mostrando a diferença das respostas com a alteração da altura do CG do veículo. A distribuição de frenagem de 60% na dianteira, embora necessária para a adequada frenagem do veículo, gera maiores valores de arfagem e mergulho.

Um veículo que apresenta carga excedente, como também sistema de freio com distribuição fora do padrão, mostrou-se diretamente influente nos movimentos estudados e consequentemente, na dinâmica do acidente e suas características.

Fig 15 – Superfície de resposta do (a) arfagem e (b) mergulho, em função da variação do CG e  $PF$ .



Tanto a Figura 14 quanto a Figura 15 mostram a importância da distribuição da frenagem. A proporção de frenagem de 60% na dianteira apresenta uma maior amplitude nos movimentos proveniente da melhor eficiência de frenagem, apresentando uma maior transferência dinâmica de peso, em que o peso na dianteira é absorvido por um sistema de freio melhor e uma eficiência melhor. Um carro de características mais baixas do que o que sai de fábrica, mostrou-se menos eficiente, o que indica que o sistema não é bem distribuído, aumentando conseqüentemente a distância de frenagem e a dinâmica, como também da altura de impacto dos veículos.

## 5.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO PROPOSTO

Os resultados das velocidades obtidas podem ser observados na Tabela. 4.

Tab. 4 – Resultados das velocidades da metodologia padrão e a proposta

Dinâmica	Metodologia Padrão		Metodologia Proposta	
Veículo	A	B	A	B
Velocidade Antes Colisão $V_1$ (Km/h)	144	0	148,7	0
Velocidade Depois Colisão $V_2$ (Km/h)	55,23	45,10	55,23	45,10

Observa-se na Tabela 4, que o veículo *B* – colidido- não apresenta velocidade antes da colisão, diferentemente do veículo *A* – colidente- que antes do processo de frenagem, apresenta velocidade de 144 km/h na metodologia padrão, divergindo em aproximadamente 3,2 % com a metodologia proposta – 148,7 km/h -, essa com o emprego dos movimentos apresentados. Ainda, a velocidade no momento do impacto, depois do processo de frenagem, 133,7 km/h contra 129 km/h da metodologia proposta. Essa diferença de velocidade não se observaria uma vez que, sem o processo de frenagem, tanto a velocidade no CG quanto a do capô – ponto do impacto – seriam iguais.

Com a Equação 11, pode-se obter as flechas de deformação  $x$ . Com o coeficiente de deformação linear do veículo estudado sendo  $\lambda=216,1$  kN/m, pode-se observar a diferença de flecha de deformação com a Tabela. 5.

Tab. 5 – Diferença da arfagem e mergulho na flecha de deformação

Considerando	Flecha de deformação $x$ (m)
Velocidade no CG	2,44
Velocidade no Ponto da extremidade (Capô)	2,35

A Tabela 5 reforça o efeito dos movimentos estudados, onde apresenta-se uma diferença de aproximadamente 3,5% de flecha de deformação, dados esses que influenciam diretamente na escolha da velocidade de dano, que se mostraram influentes na metodologia padrão para a proposta.

Ainda, a velocidade no ponto, ponto esse referente ao capo - onde é a parte da colisão-obtida pela Equação 10, mostrou-se aproximadamente 3.5 % menor que a velocidade da metodologia padrão. Essa diferença é proveniente do mergulho e arfagem, onde parte da

energia dessa velocidade, é transferida para a suspensão traseira do veículo *B*, levantando a traseira do veículo, o que é observado em casos como esse.

A metodologia proposta, não altera as velocidades dos veículos no pós colisão, como pode-se observar também pela Tabela 4, isso, pelo fato que a metodologia proposta altera a velocidade de dano - que é distorcida pelos movimentos estudados - deixando as velocidades dos veículos *A* e *B* iguais em ambas os casos no pós colisão, alterando apenas a velocidade antes da colisão.

## 6.CONCLUSOES

Com esse trabalho foi possível obter uma metodologia simplificada onde empregam-se os movimentos de arfagem e mergulho que são na maioria das vezes encontrados na dinâmica do carro e do acidente antes de uma colisão.

A obtenção da resposta gráfica serve para que se entenda melhor a sensibilidade das características do veículo que afetam diretamente na dinâmica veicular, principal na transferência dinâmica de peso. Ainda, fica clara a importância da manutenção adequada do sistema de suspensão e dos freios, mostrando-se influentes diretos na sensibilidade dos movimentos. Também, as respostas dinâmicas do veículo, uma vez mudado seu peso – pelo excesso de pessoas ou carga – ou sua altura, das características originais projetadas pelo fabricante, mostrou-se prejudicial para a dinâmica veicular e segurança.

A metodologia proposta, acrescentou de forma simplificada e direta os movimentos estudados. Frente à mudança de deformação causada pelo movimento, o mesmo tende a distorcer a velocidade real de impacto, que foi corrigida pela metodologia proposta, buscando uma maior aproximação da velocidade real. Além disso, tanto as deformações como a flecha de deformação podem ser influenciadas por materiais não genuínos ou desgaste dos mesmos, frente a pequena diferença dos resultados encontrados e aproximações, sendo sutil a diferença das velocidades.

Ainda, mostrou-se coerente os resultados obtidos, uma vez que pela diferença de altura no ponto de contato da colisão- resultado do mergulho -, deformam-se estruturas não projetadas para serem deformadas, pois o contato não busca o para-choque -peça essa com intuito de absorver energia da colisão e se deformar- e sim a parte inferior do veículo colidido e superior do colidente, deixando danos visivelmente menores.

Para trabalhos futuros, recomenda-se aplicar a mesma metodologia em casos de colisão traseira, onde nota-se a diferenças nas características e alturas da colisão, e busque-se outras metodologias e estudos para que se procure cada vez mais, uma casuística e culpabilidade mais precisa em acidentes de trânsito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, LINO LEITE. **Acidentes de Trânsito: Novos Métodos de Cálculo de Velocidade**. Primeira Ed. Campinas: Millennium Editora, 2014.

ALMEIDA, LINO LEITE. **Manual de Perícias em Acidentes de Trânsito**. Primeira Ed. Campinas: Millennium Editora, 2011.

CAMPBELL, K.E. **Energy Basis for Collision Severity. Environmental Activities Staff**, General Motors Comp., SAE Paper 740565, 1974.

DU, X.; JIN.;ZHANG, X.; SHEN, J.; HOU, X. **Geometry features measurement of traffic accident for reconstruction based on close-range photogrammetry**. Shanghai, Elsevier Ltd, 2009, 505p.

ENDO, SÍLVIO KYOJI. **Investigação em locais de acidente de tráfego – Capacitação e Formação da Área de Segurança Pública**. Cuiabá: Coordenadoria Geral de Perícias e Identificações, 2003.

GILLESPIE, T, D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992, 495 p.

IRURETA, VICTOR A. **Accidentologia Vial y Pericia**. Terceira ed. Ediciones La Rocca. 2003.

PERUZZO, R, A. **Considerações Sobre a Dinâmica Veicular Visando Acidentes Veiculares**. Dissertação Mestrado, Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação UFRGS, PROMEC, 2010.

REZA, N, J. **Vehicle Dynamics: Theory and application**. 2nd Edition, Springer Science, 2014.

STANIFORTH, A. **Competition car suspension**, Haynes Publishing, 1999, 3rd edition.

VANGI, D. **Simplified method for evaluating energy loss in vehicle collisions**. Florence, Elsevier Ltd,2009,641.

WONG, J, Y. **Theory of Ground Vehicles**. Third Edition, 2001, 521 p.

## ANEXO

Tab. A.1 Tabela de K, Irureta (2003).

Pavimento	Veículo de Passeio		Caminhões	
	K seco	K úmido	K seco	K úmido
Asfalto Novo	0,85	0,60	0,60	0,42
Asfalto Velho	0,70	0,55	0,49	0,39
Asfalto Escorregadio	0,55	0,35	0,39	0,25
Concreto Novo	0,85	0,55	0,60	0,39
Concreto Velho	0,70	0,55	0,49	0,39
Pedra Limpa	0,60	0,40	0,42	0,28
Pedregulho	0,65	0,65	0,46	0,46
Terra dura	0,65	0,70	0,46	0,49
Terra solta	0,50	0,55	0,35	0,39
Pavimento com areia	0,45	0,30	0,32	0,21
Pavimento com barro	0,45	0,30	0,32	0,21
Barro sobre pedra	0,40	0,25	0,28	0,18
Pavimento com neve	0,30	0,20	0,21	0,14

Gelo cristal	0,15	0,07	0,11	0,05
--------------	------	------	------	------

Tab.A.2 – Tipo de avaria x velocidade de dano, Endo (2003).

Tipo de avaria	Velocidade de dano (km/h)
Entortar Para-choque	5
Quebrar para-choque	10
Quebrar para-choque e grade do radiador	15/20
Quabrar para-choque, faróis, afundar grade, amassar capô, deformar lataria anterior	20/30
Quebrar para-choque, afundar grade, faróis, amassar capô, deformar lataria, encostar motor.	30/40
Afundar grade do radiador mais colmeia	40/45
Arrancar suspensão	40/45
Arrancar roda diretriz	40/45
Partir longarina	50/60
Arrancar motor dos calços / deslocar motor	60/70
Arrancar roda motriz	50/60

## APÊNDICE

Fig A.1 – Simulação da frenagem.

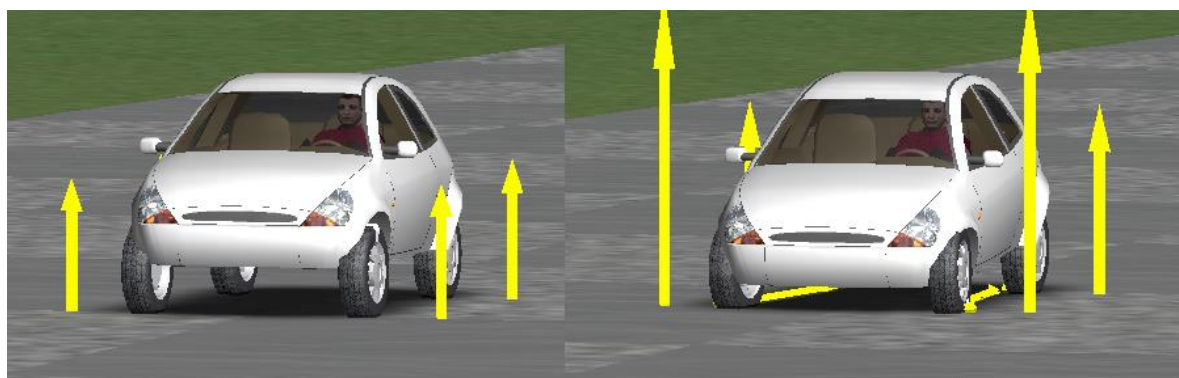




Fig A.2 - Efeito do mergulho e arfagem (dano grave).



Fig A.3 – Efeito do mergulho e arfagem (dano leve).



Fig A.4 – Flecha de deformação até a porta.



Figura A.5 – Desalinhamento de porta, flecha de deformação.



Figura A.6 – Características de deformação sem frenagem.



FiguraA.7 – Características de deformação com frenagem.



Figura A.8 – Colisão com características sem frenagem.

