

## DINÂMICA VEICULAR NA RECONSTRUÇÃO DE ACIDENTES

**Walter J. Paucar Casas, Tiago Ch. Mello, Régis A. Peruzzo**

*Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite 425, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil, [walter.paucar.casas@ufrgs.br](mailto:walter.paucar.casas@ufrgs.br), <http://www.mecanica.ufrgs.br>*

**Palavras-chave:** Colisão Veicular, Segurança Veicular, Sistema Multicorpo.

**Resumo.** A reconstrução de acidentes se faz necessária sempre que não houver um consenso entre as partes envolvidas no evento. A maior ou menor complexidade do trabalho de reconstrução dependerá da quantidade de informações registradas, da qualidade dessas informações e do tipo de acidente. Para facilitar o desenvolvimento do trabalho de reconstrução as informações registradas devem ter fidelidade para auxiliar no esclarecimento das etapas do evento. Neste trabalho busca-se, partindo das informações registradas sobre um acidente veicular, verificar a possibilidade da sua reconstrução a partir dessas informações. Simplificações quanto ao comportamento dos pneus e a própria deformação da camada de borracha foram desprezadas pelo fato dos pneus estarem derrapando sobre a via, mantendo um aparente comportamento de deslizamento. O giro do veículo na avaliação dinâmica também é desprezado como simplificação. Para verificar os resultados da abordagem analítica e os resultados constantes no registro utilizam-se recursos de simulação computacional para confirmar ou não esses resultados. Desta maneira, alguns eventos do acidente veicular foram reproduzidos parcialmente, em função da qualidade das informações disponíveis. Os resultados obtidos desse desenvolvimento confirmam algumas informações do registro e se contrapõem em outros.

## 1 INTRODUÇÃO

Os acidentes registrados nas vias começaram a ter importância para a sociedade quando um grande número de ocorrências passou a ser observada, envolvendo prioritariamente veículos. Os registros dos primeiros acidentes datam do início do século XIX, quando os meios de comunicação da época os registravam como uma novidade, atualmente esses dados são armazenados para se tornarem registros estatísticos e servem de fonte para pesquisa e análise.

Os fabricantes investem em estudos para desenvolver testes que permitem entender a dinâmica da colisão. O primeiro teste deste tipo teria sido realizado por volta de 1915 pela fábrica americana Dodge. Esse tipo de teste é vital na atualidade com a finalidade de estudar e desenvolver meios de proteção na colisão veicular. A partir de 2014, todo veículo produzido no Brasil deverá ser aprovado por teste de impacto. Atualmente esse teste é realizado para fins de natureza estrutural, devendo adquirir também o caráter dos critérios biomecânicos.

Segundo Bertocchi (2005), da preocupação de tentar reduzir o número de acidentes nasceu a *acidentologia*, que se preocupa em caracterizar o acidente; no que diz respeito a sua natureza; forma de ocorrência; sua repetição sistêmica; como, onde e quando ocorrem. E da necessidade de entender os mecanismos envolvidos em uma colisão surgiu a *acidentometria*, a qual se preocupa em analisar por meio de modelos matemáticos as diversas variáveis envolvidas nos acidentes com o objetivo de criar meios de prevenção.

A reconstrução de acidentes geralmente é necessária quando os meios de prevenção não funcionaram e se faz necessária uma melhor apreciação das etapas da colisão nas quais as evidências não são, por si só, suficientes para obter a sua correta seqüência e esclarecer os fatos da maneira mais exata possível.

A reconstrução de um acidente, tema deste trabalho, pode fazer uso da análise da deformação estrutural, da dinâmica veicular, dos dados dos fabricantes de veículos, testes experimentais, e utilização de programas que permitam modelar e simular os eventos. Juntar todas essas informações e conhecimentos para encontrar as causas e reconstruir o evento da maneira mais exata, se traduz no foco de diversas pesquisas.

O objetivo principal do trabalho é reconstruir um acidente veicular a partir de dados com informações de um registro padrão, verificando se as informações são suficientes para reconstruir o acidente, para o qual iremos averiguar por meio da modelagem e simulação computacional as diversas etapas consoantes ao estudo do acidente veicular.

No contexto citado, Weng et al. (2010) propuseram uma metodologia para reconstrução de acidentes com colisão entre pedestres e veículos baseada na dinâmica multicorpos para os pedestres, combinando métodos analíticos juntamente com procedimentos de simulações.

A grande fidelidade dos resultados proporcionados pela modelagem multicorpos tem despertado o desenvolvimento de programas que permitem conhecer com maior precisão os mecanismos de um acidente. Conforme o estudo de Konosu (2002), quem desenvolvera e testara o programa de simulação de acidentes JARI, os resultados obtidos em simulação quando comparados com os dados reais de acidentes foram satisfatórios. O desenvolvimento e a utilização de programas multicorpos possibilita simular como o corpo humano, por exemplo, se movimenta durante uma colisão. Assim, com técnicas desenvolvidas para estudar as lesões podemos prever como acontece o contato do corpo com a forma externa do veículo.

A utilização de programas específicos para análise dinâmica de acidentes como o CARAT, PC-Crash, Virtual Crash e V-sim são utilizados para análise da trajetória dos veículos. Para análise dos movimentos do corpo humano em três dimensões e sua interação com o interior do veículo são utilizados programas como o MADYMO, ADAMS, PAM-SAFE, ASIMIR, RAMSIS e ATB.

## 2 SELEÇÃO DO VEÍCULO E DEFINIÇÃO DE SUAS CARACTERÍSTICAS

Os dados do veículo em estudo correspondem a um modelo de quatro portas. A Figura 1, apresenta a identificação das dimensões externas do veículo

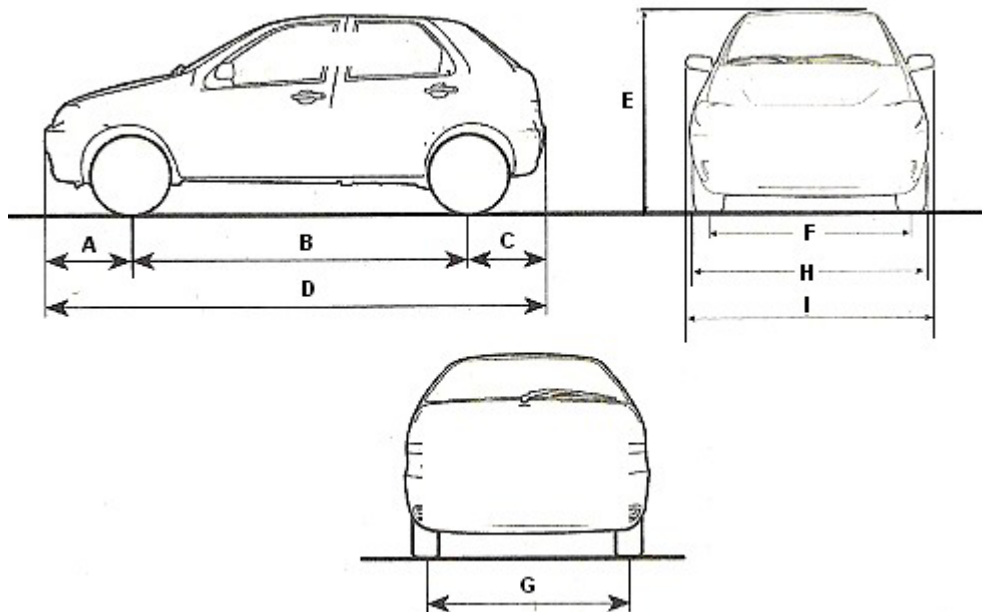


Figura 1: Identificação dimensional do veículo

Os dados indicados na Tabela 1, Tabela 3 e Tabela 2 são referentes ao veículo em análise, os quais serão utilizados para análise e determinação do comportamento dinâmico.

Variável (Figura 1)	Grandeza	Valor [m]
<i>A</i>	Eixo dianteiro ao extremo frontal	0,767
<i>B</i>	Distância entre eixos	2,373
<i>C</i>	Eixo traseiro ao extremo posterior	0,623
<i>D</i>	Comprimento total	3,763
<i>E</i>	Altura	1,440
<i>F</i>	Bitola eixo dianteiro	1,415
<i>G</i>	Bitola eixo traseiro	1,378
<i>H</i>	Largura do chassi	1,620
<i>I</i>	Largura do veículo	1,905

Tabela 1 Definição dimensional do veículo

Rodas	Câmbor	Cáster	Convergência
Dianteiras	$-30' \pm 30'$	$1^{\circ} 34' \pm 30'$	$-1 \pm 1$ mm
Traseiras	$-45' \pm 30'$	$0^{\circ}$	$-1,5 \pm 1,5$ mm

Tabela 2 Alinhamento das rodas do veículo

A Figura 2 apresenta as principais variáveis dinâmicas do veículo, conforme a Tabela 1 e Tabela 3. Além disso, também serve para ilustrar as variáveis que são informadas no programa CarSim, usada neste trabalho para o processo de integração numérica do modelo multicorpo. O programa permite a possibilidade de informar a massa suspensa e não

suspensas com vistas a realizar a simulação dinâmica dos eventos.

Grandeza	Variável	Valor
Massa suspensa		880 kg
Massa não suspensa dianteira (cada suspensão)		25 kg
Massa não suspensa traseira (cada suspensão)		25 kg
Momento de inércia de rolagem (roll)	$I_{xx}$	
Momento de inércia de balanço (pitch)	$I_{yy}$	
Momento de inércia de guinada (yaw)	$I_{zz}$	
Distância entre o $CG_x$ e o eixo dianteiro	$b$	0,937 m
Distância entre o $CG_x$ e o eixo traseiro	$c$	1,436 m
Posição vertical do centro de gravidade $CG_z$	$h$	0,529 m

Tabela 3 Características dinâmicas do veículo

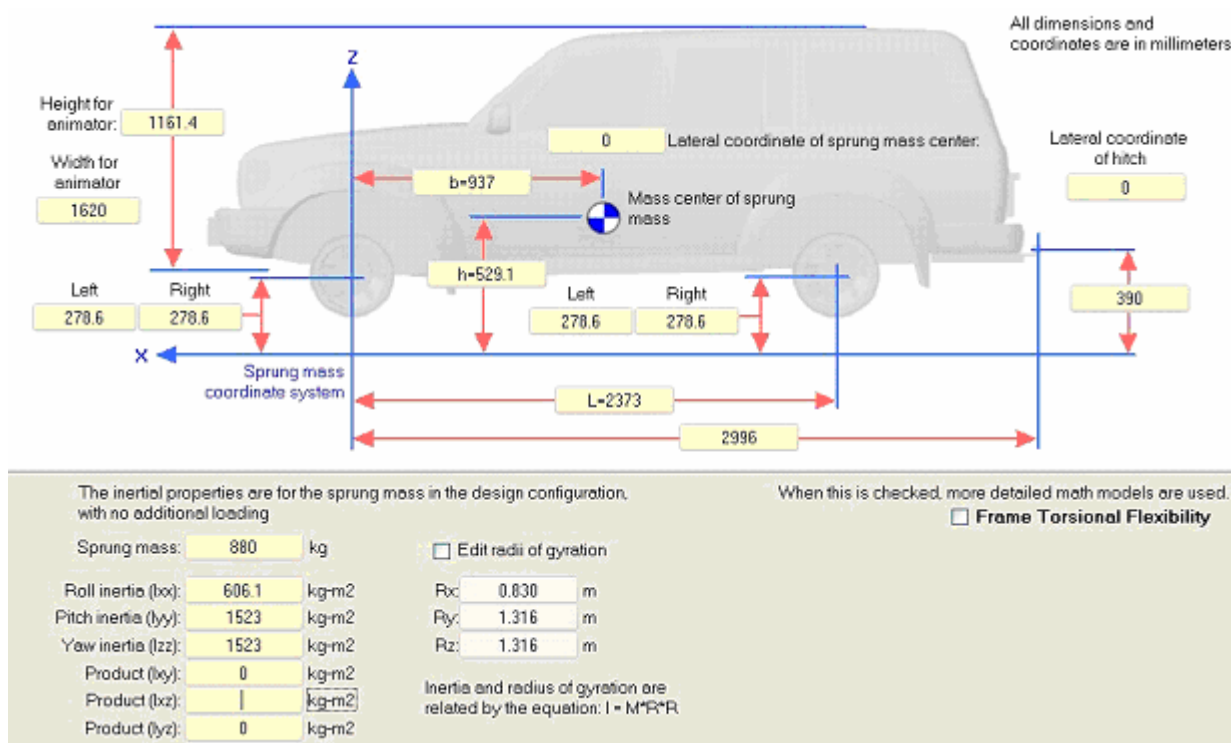


Figura 2 Variáveis do veículo

### 3 ABORDAGEM ANALÍTICA DO ACIDENTE

Utilizaram-se como fonte de dados para definir os parâmetros e variáveis necessárias à abordagem de um problema de reconstrução de acidentes as informações constantes e consideradas relevantes em documentos emitidos para esse fim. As características do veículo a ser considerado foram apresentadas na seção anterior. A Figura 3 mostra o croqui de uma colisão, com a sequência das prováveis etapas do evento e as distâncias associadas percorridas pelo veículo.

Considera-se 39,5 m de marcas dos pneus até a posição final de repouso do veículo, sendo que no início as marcas eram de frenagem e logo seguidas de derrapagem. As marcas iniciam na pista do meio, duplas e retas, seguida de uma curvatura à esquerda, aparecendo quatro marcas se afastando, correspondendo ao giro do veículo à esquerda em sentido anti-horário.

As marcas dos pneus interceptam o meio fio da calçada após 27,8 m contados desde o início, avançando mais 8,2 m até atingir os 36 m para o veículo colidir com um poste de concreto da rede de telefonia. O resultado dessa colisão foi a fratura do poste e o seu deslocamento de sua posição original. Para finalizar o veículo inverte seu sentido de giro, passando a girar no sentido horário, avançando 3,5 m desde o ponto de fixação do poste danificado até a posição de parada final.

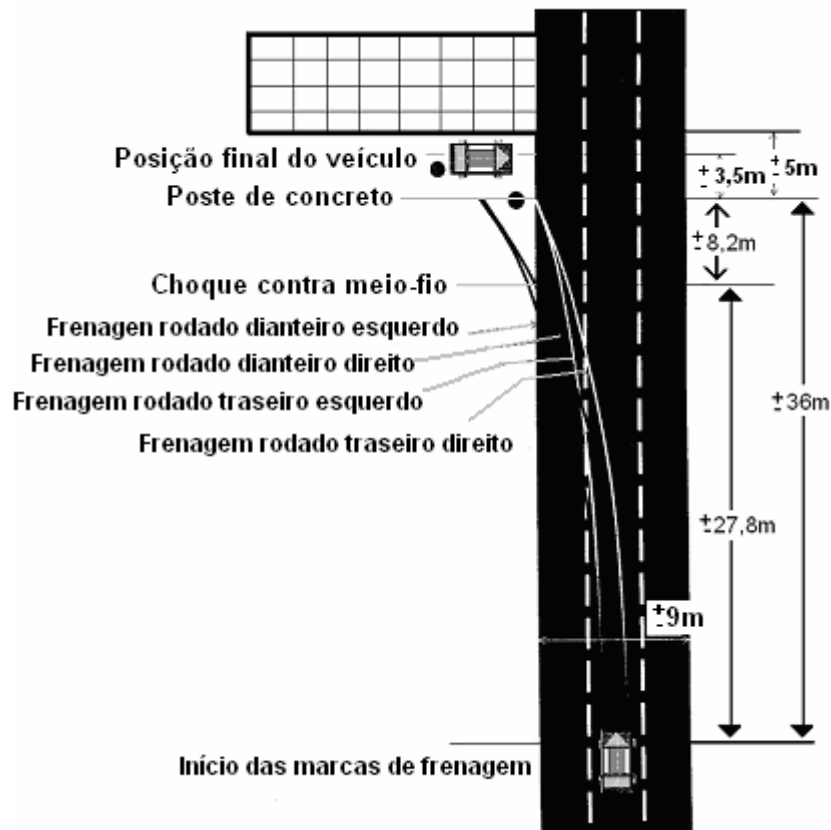


Figura 3 Etapas e distâncias percorridas na colisão de um veículo

Na Figura 4 se apresenta o perfil de inclinação da via, situação que teria contribuído com o salto do veículo, antes do início das marcas de frenagem, e que se torna na análise principal deste trabalho.

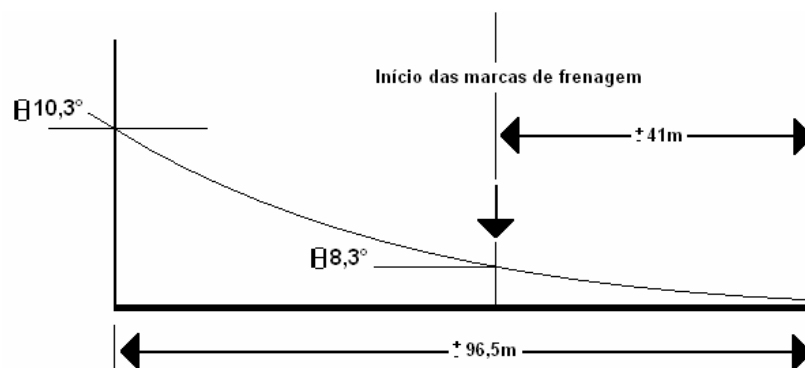


Figura 4 Perfil de inclinação da via

Considerando as marcas dos pneus, considera-se fundamental a determinação da velocidade do veículo antes do início das marcas e também a sua velocidade previa a sua colisão com o principal elemento referido do local, neste caso, o poste de telefonia.

Parte-se do princípio de que o veículo, antes do início da frenagem, estaria apenas em movimento de translação. A energia cinética  $E_c$  é dissipada por completo até o veículo atingir a posição de repouso, para tanto a energia é dissipada na forma de trabalho e pode ser dividida em cinco partes relacionadas com as etapas do evento descritas a seguir.

- Trabalho mecânico dissipado na frenagem e derrapagem, ( $W_{freios}$ )
- Trabalho mecânico dissipado no dano ao veículo, ( $W_{dano\_veiculo}$ )
- Trabalho mecânico dissipado no dano ao poste de concreto, ( $W_{dano\_poste}$ )
- Trabalho mecânico dissipado no movimento de inversão do sentido de rotação ao bater no poste de concreto até o repouso, ( $W_{giro}$ )
- Trabalho mecânico residual dissipado no deslocamento até a posição de repouso, ( $W_{residual}$ )

Utilizando o princípio de trabalho e energia, desconsiderando a energia cinética de rotação, tem-se a Eq. 1.

$$E_c = W_{freios} + W_{dano\_veiculo} + W_{dano\_poste} + W_{giro} + W_{residual} \quad (1)$$

Assim, o veículo de massa  $m$  apresenta uma velocidade inicial  $v_{inicial}$ , antes do início das marcas de frenagem, segundo a Eq. (2).

$$v_{inicial} = \sqrt{\frac{2}{m}(W_{freios} + W_{dano\_veiculo} + W_{dano\_poste} + W_{giro} + W_{residual})} \quad (2)$$

Duas formas diferentes para avaliar a velocidade inicial são expostas na Tabela 4, as quais são usadas para calcular as distâncias do salto aparente do veículo. Assume-se neste trabalho um tempo mínimo de reação do motorista equivalente a 1,75 s, se calculando a distância percorrida de reação que é somada à distância do salto, após o qual se exerce a frenagem.

Do início da Figura 4, onde teria se iniciado o salto, soma-se a distância do salto e a distância de reação, e se compara com os 55,5 m antes de iniciar as marcas de frenagem, para uma altura da pista  $h = 55,5 \tan 8,3^\circ$  correspondente a 8,1 m. Os resultados demonstram uma distância acumulada considerável, indicando que o tempo de reação é menor ou que a velocidade inicial deveria ser menor, situações que precisam ser melhor avaliadas.

Grandeza	Velocidade (m/s)	Distância percorrida (m)				
		Salto $x = \sqrt{\frac{2hv^2}{g}}$	Reação 1,75 s $x = vt$	Acumulad o (salto + reação)	Frenagem	Acumulado- frenagem
$v_{frenagem}$	19,68	25,3	34,5	59,8	55,5	4,3
$\sqrt{v_{frenagem}^2 + v_{dano\_poste}^2}$	30,98	39,8	54,2	94	55,5	38,5

Tabela 4 Comparativo de velocidades iniciais e distâncias percorridas

A literatura comenta que quando um veículo roda ou gira na pista, uma análise da conservação do momento angular deveria ser considerada, e ainda o giro influencia o cálculo do coeficiente de atrito, o qual deve ser considerado nos equacionamentos.

#### 4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL SEM FRENAGEM NEM MUDANÇA DE DIREÇÃO

O objetivo desta seção é reproduzir em ambiente computacional algumas das etapas que são descritas em documentos de acidentes de trânsito, utilizando o programa Carsim. Para tanto se adota nesse caso as características do veículo descritas na seção anterior, considerando uma velocidade inicial de 27,78 m/s (100 km/h), além dos seguintes parâmetros.

$T_i$ : tempo no início do salto = 1,40s

$T_f$ : tempo ao final do salto = 2,27s

$T_v$ : tempo de salto = 0,87 s

Neste caso considera-se a hipótese de não aplicação dos freios nem da utilização da direção para efetuar alguma manobra. A escolha dos parâmetros que definem esta simulação foi de tal modo que permitisse analisar apenas o comportamento dinâmico do veículo sob influência da velocidade inicial e da inclinação da via. Para facilitar a visualização utilizou-se o efeito de um recuso do programa chamado *ghost*, que reproduz a quantidade especificada de frames.

Como pode-se observar na Figura 5 o veículo salta em função da inclinação da via.

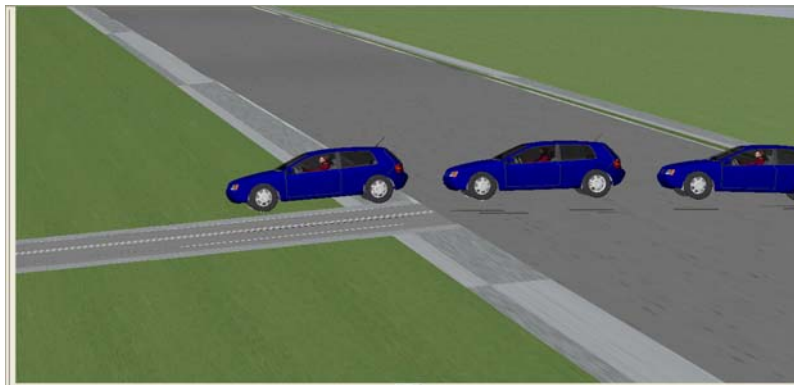


Figura 5: Início do salto

A Figura 6 apresenta o instante em que o veículo retoma o contato com a superfície da via.

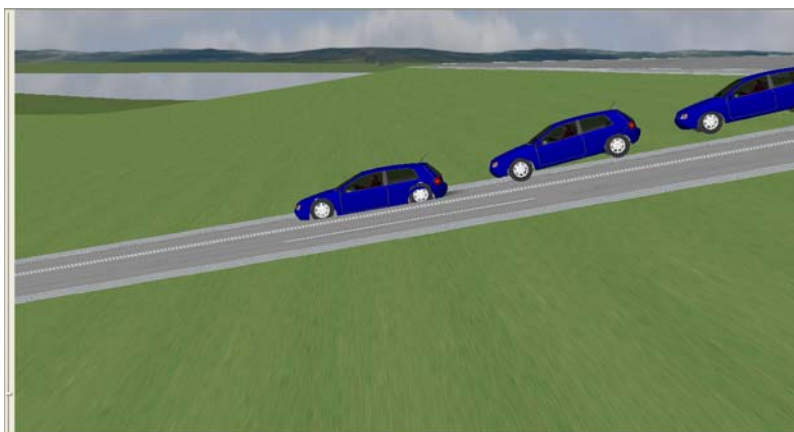


Figura 6: Pouso do veículo

Na Figura 7 pode-se constatar que o veículo atinge a superfície da via e salta repetidamente, com isso perdendo contato com a superfície da via. Esse resultado da simulação conduz à observação de marcas de frenagem não contínuas, o que não confere com o resultado apresentado nos registros, pelo fato das marcas de frenagem terem sido contínuas, portanto a velocidade inicial deveria ser menor ou existem outros agentes não considerados ou dados incompletos do veículo que não puderam ser adequadamente configurados no programa.



Figura 7: Rebote do veículo

A Figura 8 mostraria o desenvolvimento da velocidade do centro de massa do veículo e das rodas durante o evento. Observa-se que o veículo continua aumentando a sua velocidade em relação à inicial, isto porque se utilizou a opção de aceleração livre, apenas a velocidade inicial foi definida. Esta hipótese igualmente é plausível de contestação.

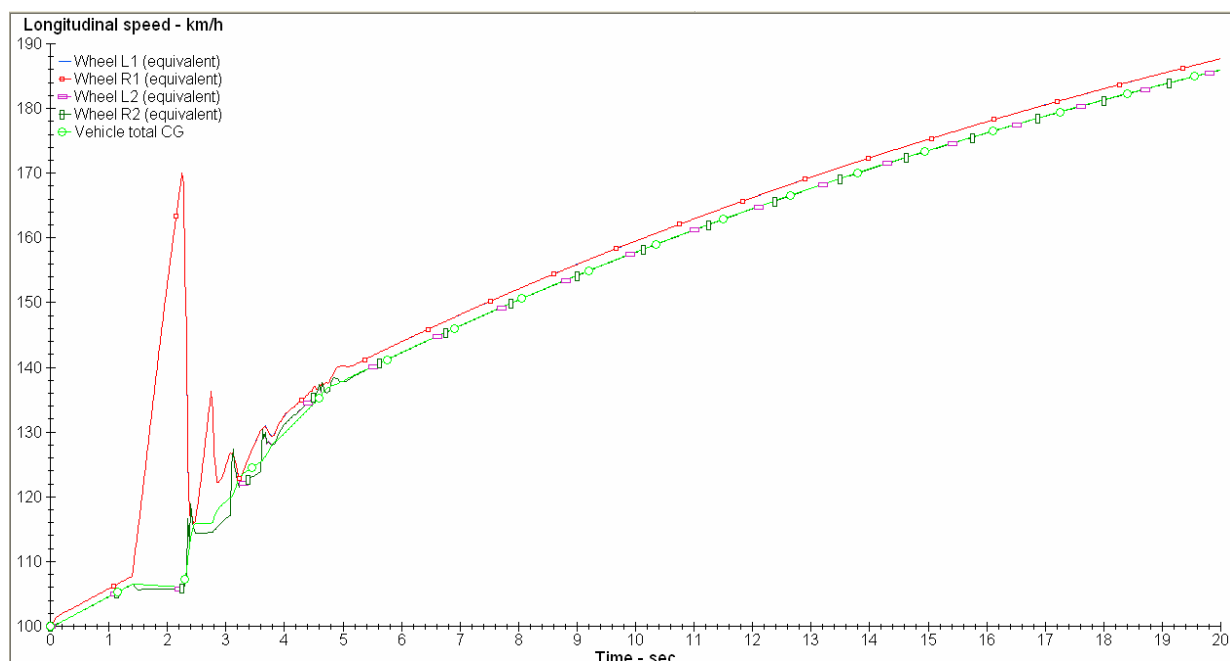


Figura 8: Variação da velocidade do veículo

A Figura 9 mostraria a variação da aceleração do veículo, a partir do qual se poder averiguar a aceleração experimentada pelos passageiros do veículo nesse evento sob as condições determinadas na simulação.



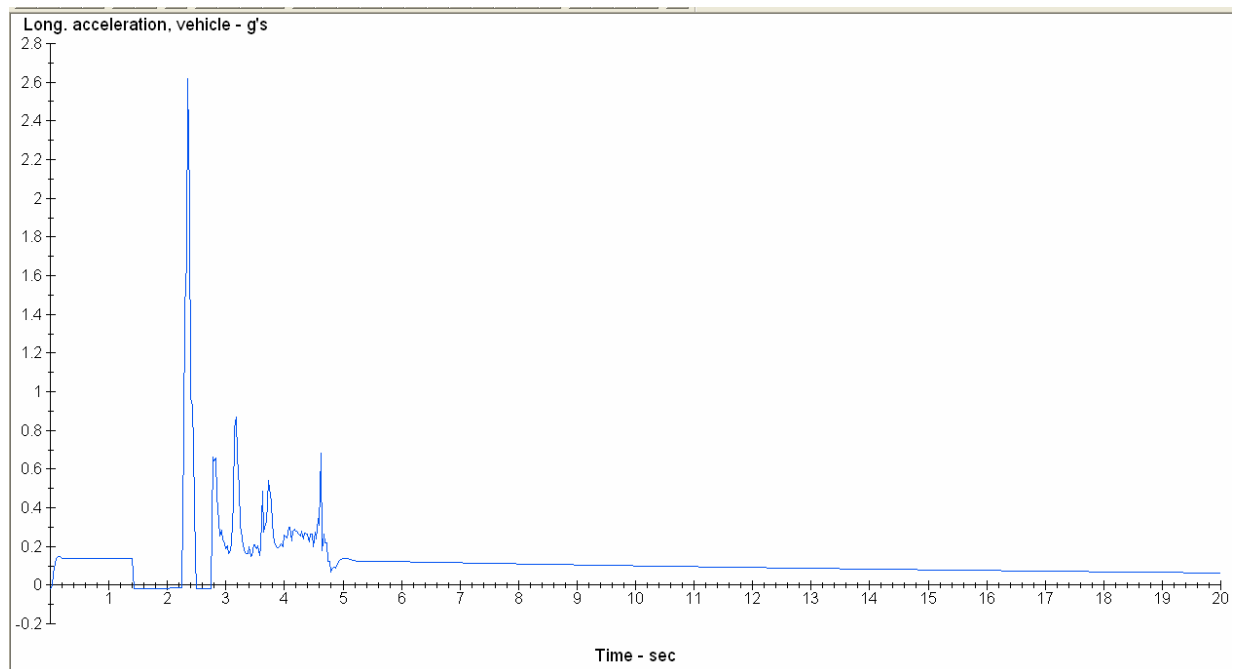


Figura 9: Variação da aceleração do veículo

A Figura 10 apresenta as forças de contato entre os pneus e a superfície da via durante o deslocamento do veículo. Com esta simulação pode-se constatar que o veículo salta, através da interpretação de que nos tempos em que a força tem valor zero, o veículo está no ar. Pode-se ainda medir o tempo de salto e a distância do salto. Pode-se também verificar se as forças geradas durante o evento são suficientemente grandes para estourar os pneus, e confrontar com as informações relatadas no documento.

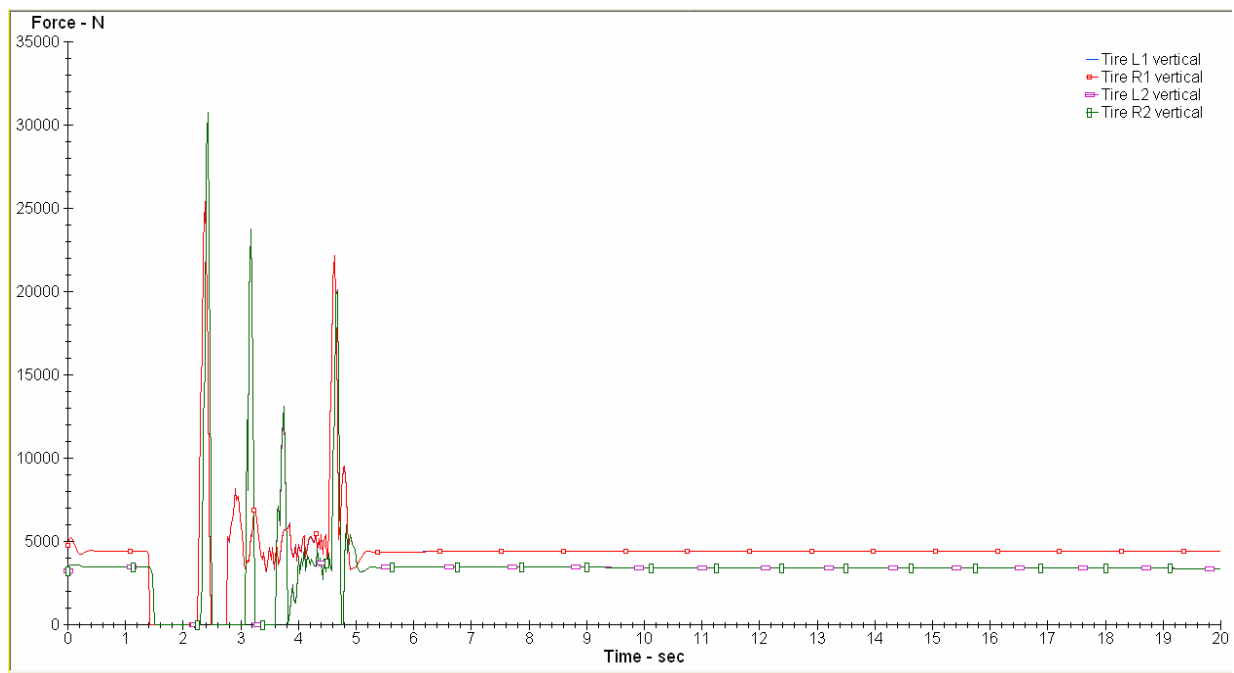


Figura 10 Variação das forças de contato nos pneus com a via

## 5 CONCLUSÕES

A avaliação de dano em veículos e passageiros por causa de acidentes veiculares apresenta situações particulares que se traduzem em programas especialmente desenvolvidos para esse fim, como o PC-Crash. Neste trabalho por questões de disponibilidade utilizam-se as ferramentas disponibilizadas pelo programa CARSIM, o mesmo que é uma plataforma de dinâmica veicular geral.

A utilização da dinâmica veicular e programas na reconstrução de acidentes exigem uma metodologia que envolva a comprovação de soluções analíticas nos programas, contudo a disponibilidade de dados para serem alimentados nos programas geralmente são insuficientes, o que origina resultados com relativa aproximação.

A simulação sem frenagem nem mudança de direção com velocidade inicial de 27,78 m/s (100 km/h), faz que o veículo perca o contato com a pista; só que esse salto, na simulação, proporciona ao veículo um grande choque ao retomar o contato com a via, se manifestando com outros pequenos saltos do veículo não proporcionando as marcas de frenagem contínuas, como as relatadas nos registros, o qual pode estar associado com uma menor velocidade no início do salto ou outras variáveis não informadas ao programa.

## REFERENCIAS

- Bertocchi, M., *Segurança veicular*, Campinas, São Paulo, Brasil. Skill Elaboração de Materiais Didáticos Ltda, 2005, 221 p.
- Konosu, A.; Reconstruction analysis for car-pedestrian accidents using a computer simulation model. *JSAE Review*, 23(3):357-363, 2002.
- Weng, Y., Jin, X., Zhao, Z. and Zhang, X. Car-to-pedestrian collision reconstruction with injury as an evaluation index. *Accident Analysis & Prevention*, 42(4):1320-1325, 2010.