



UM MODELO PARA COLISÃO DE VEÍCULOS TERRESTRES COM ESTRUTURA DEFORMÁVEL

Renato Seixas da Rocha e Mauro Speranza Neto

Pontifícia Universidade Católica, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RIO
Rua Marquês de São Vicente, 255 - Gávea - CEP 22453-900 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Fernando Ribeiro da Silva

Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais, IME
Praça General Tibúrcio, s.nº - Praia Vermelha - CEP 22290-270 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

***Resumo.** Apresenta-se neste trabalho o desenvolvimento de um modelo simplificado para simulação computacional da colisão de um veículo terrestre levando em consideração as deformações dinâmicas que ocorrem durante o choque. A partir de resultados experimentais, levantados durante testes de impacto (“crash-tests”) simula-se em programas comerciais a desaceleração sofrida pelo veículo. Ilustra-se o trabalho com os resultados obtidos até o momento com este modelo, comparando-os com algumas informações encontradas na literatura.*

***Palavras-chave:** Dinâmica de Veículos, Ensaio de Colisão, Impacto Frontal*

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios de colisão (“crash-tests”) são parte fundamental do processo de avaliação da segurança que os veículos podem proporcionar aos seus passageiros. Estes ensaios vêm fornecendo para os projetistas ao longo dos anos informações relativas ao modo como a estrutura dos veículos se deformam em diferentes tipos de colisões. Uma das geometrias de colisão mais comum é a de impacto frontal atingindo 100% da superfície dianteira do veículo, onde se procura avaliar a capacidade da estrutura frontal de desacelerar o habitáculo dos passageiros e de não invadí-lo, como por exemplo, com o recuo excessivo da coluna de direção.

Como o custo destes ensaios é elevado, o desenvolvimento de modelos numéricos que reproduzam a física da colisão vêm ganhando importância crescente. Atualmente, modelos de elementos finitos complexos como nos trabalhos de (Zaouk *et al.*, 1996) e (Marzougui *et al.*, 1996) vem sendo desenvolvidos e validados com medições de ensaios reais. Apesar da utilização de modelos sofisticados e detalhados ser a maneira correta de se abordar o problema quando se deseja analisar os pormenores do processo de colisão e o projeto do veículo, estes modelos ainda têm um custo computacional elevado, exigindo grandes velocidades de

processamento e capacidade de armazenamento que não são encontrados em sistemas computacionais mais modestos.

Quando se deseja entretanto, analisar a reconstituição de acidentes, onde estão envolvidas a análise da dinâmica lateral, longitudinal e vertical dos veículos para se obter as trajetórias corretas destes até o momento da colisão o uso destes modelos mais detalhados não é viável. Normalmente, nestes tipos de análises os veículos são modelados como corpos rígidos. O que se busca agora é desenvolver um modelo com periferia deformável que a partir do momento do contato entre os corpos seja capaz de quantificar acuradamente as deformações dos veículos de maneira global. Pretende-se assim, desenvolver modelos de colisão mais simples que aqueles que detalham cuidadosamente os veículos e, portanto, sejam mais eficientes computacionalmente. O desafio neste tipo de abordagem está no fato de após simplificar-se significativamente o modelo ele ainda incorpore os principais aspectos físicos envolvidos no problema.

Pode-se determinar o comportamento da desaceleração sofrida pelo veículo nas mais diversas condições, como por exemplo em choques frontais contra barreiras rígidas ou flexíveis ou choques laterais contra outro veículo. Iniciando o desenvolvimento de um modelo simplificado, analisa-se primeiro o problema do ensaio de colisão frontal. Com base nas informações obtidas nestes ensaios de colisão pode-se estabelecer como a estrutura do veículo se deforma ao longo do tempo, levando em consideração os principais efeitos, sem a necessidade de se detalhar sua forma geométrica ou mesmo o material que a compõe. Assim, a partir da análise dos resultados citados, foi desenvolvido um modelo de corpo rígido para o veículo, com periferia deformável, na qual procurou-se representar o comportamento viscoplástico da estrutura dianteira. Assim, as características globais de evolução das deformações, em função da desaceleração, foram obtidas sem a preocupação de se representar a estrutura propriamente dita, os vínculos existentes entre os vários componentes, suas geometrias e principalmente não se introduziu no modelo os diversos tipos de materiais e seus comportamentos nestas condições de operação. Deste modo, tratando o problema globalmente, e não localmente, obteve-se um modelo simplificado, eficiente em termos computacionais, para que a evolução da colisão, e das deformações estruturais, pudesse ser simulada.

2. O PROBLEMA REAL DE COLISÃO

Na colisão de um carro contra uma barreira rígida é razoável assumir que o trabalho realizado para se deformar a estrutura dianteira é igual a perda de energia cinética do carro, que é trazido até o repouso. A maior parte da energia cinética é transformada em energia de deformação plástica na estrutura e o restante é dissipado por efeitos térmicos e sonoros.

Em (Fenton, 1996) são apresentados pulsos típicos da força de impacto entre a barreira e o carro. Estes gráficos mostram os efeitos das diferentes partes do veículo (rígidas e flexíveis) reagindo ao impacto, como por exemplo, o radiador, o motor e as rodas e suspensões dianteiras. Através de gráficos como estes é que são projetadas as estruturas dianteira e traseira dos veículos, para que estas absorvam a energia do impacto gerando desacelerações suaves no compartimento de passageiros (habitáculo), que tem uma constituição rígida para evitar a sua deformação excessiva e a intrusão de partes não estruturais que se deslocam e poderiam ferir os passageiros.

A Fig. 1 apresenta um gráfico experimental de desaceleração típico do compartimento de passageiros de um veículo médio ao colidir com uma barreira indeformável a uma velocidade de 13,9 m/s (50 km/h), como o apresentado por (Madureira, 1998). A aceleração média nesta colisão é de aproximadamente -144 m/s^2 (-14,7 g), portanto, abaixo da aceleração média

máxima considerada como limite de sobrevivência, que é de -196 m/s^2 (-20 g). Na Fig. 2 apresenta-se o gráfico da velocidade do compartimento de passageiros e na Fig. 3 o gráfico do seu deslocamento.

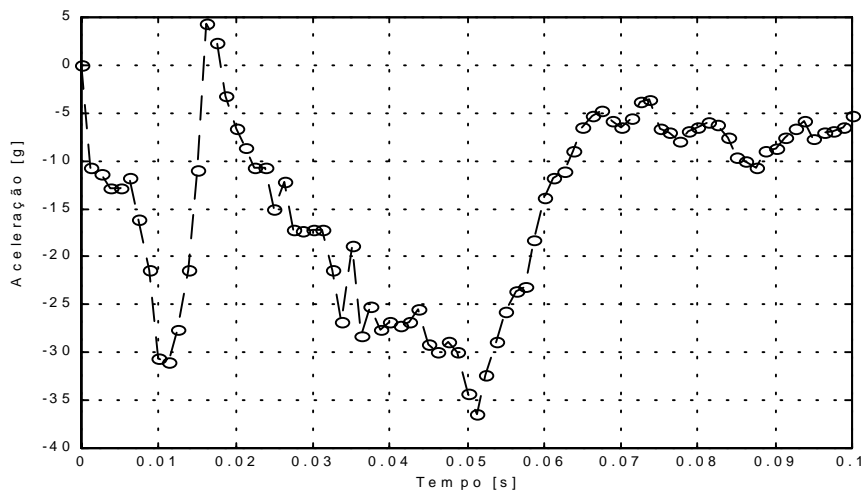


Figura 1 - Aceleração do compartimento de passageiros.

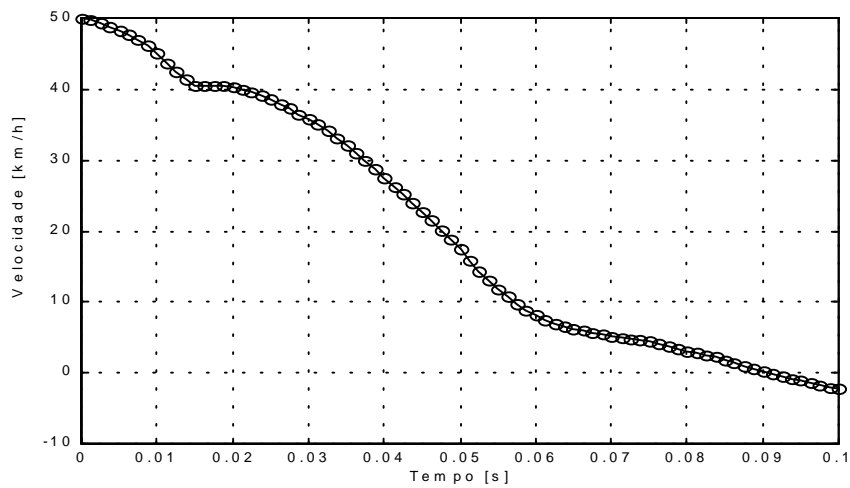


Figura 2 - Velocidade do compartimento de passageiros.

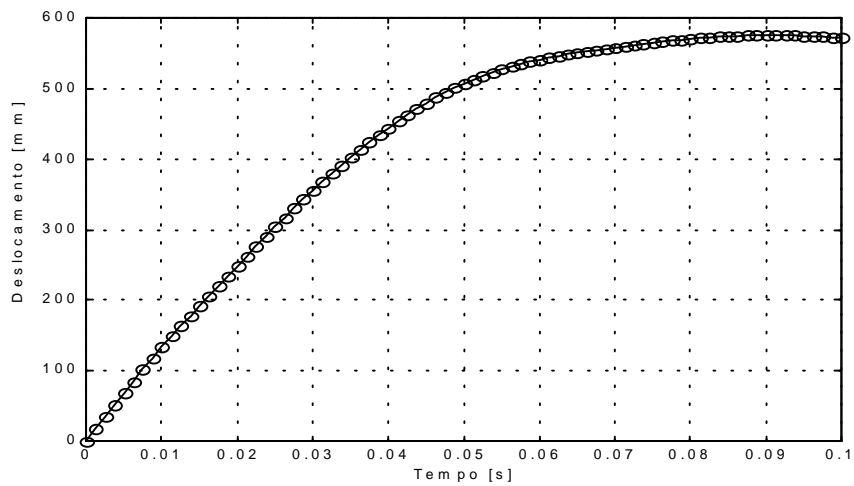


Figura 3 - Deslocamento do compartimento de passageiros.

3. PRIMEIRO MODELO PARA A ANÁLISE DO PROBLEMA DE COLISÃO

Dentro da filosofia de desenvolver um modelo simples para a análise do problema de colisão, propôs-se inicialmente o sistema mostrado na Fig. 4, que é um massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade. Nesse modelo a energia interna acumulada pela deformação plástica da estrutura dianteira é, apenas por analogia, representada pela energia dissipada pelo elemento amortecedor. Assim, a quantidade de energia que é dissipada pelo amortecedor no modelo, e não retorna ao sistema, é interpretada como a parcela de energia acumulada na estrutura que, também, não retorna ao sistema real.

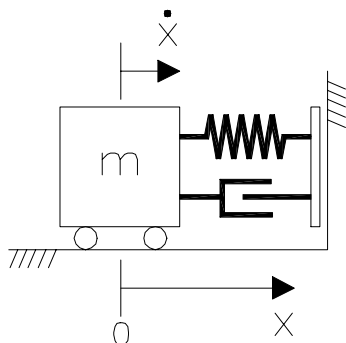


Figura 4 - Modelo de 1 grau de liberdade para o problema de colisão.

Na equação do movimento da massa m , Eq. (1), $F_b(\dot{x})$ e $F_k(x)$ são as forças do amortecedor e da mola respectivamente. Considerando as condições dos testes mencionados na seção anterior, as condições iniciais para esta equação diferencial não-linear são $\dot{x}(0) = 13,9 \text{ m/s}$ e $x(0) = 0 \text{ m}$.

$$m\ddot{x} + F_b(\dot{x}) + F_k(x) = 0 \quad (1)$$

Considerando a hipótese de que a desaceleração é constante e igual a média, $a_m = -14,7 \text{ g}$, e que a relação constitutiva do amortecedor $F_b = F_b(\dot{x})$ é linear, chega-se a conclusão através da Eq.1, de que a força da mola tem que ser, também, linear com o tempo, como mostra a Fig. 5. O tempo t_f é o instante em que a velocidade no compartimento dos passageiros é nula e a deformação é máxima.

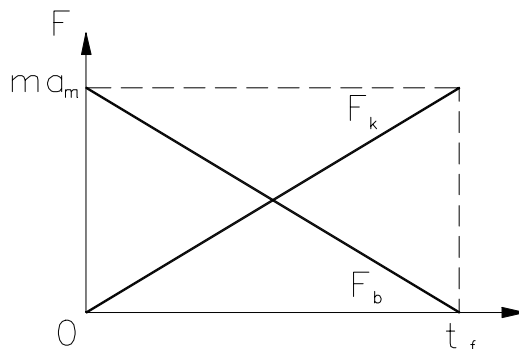


Figura 5 - Comportamento no tempo da força do amortecedor e da mola para $a_m = \text{constante}$.

O resultado destas hipóteses é uma relação constitutiva não-linear para a mola $F_k = F_k(x)$ dada pela Eq. (2) e mostrada no gráfico da Fig. 6, onde a sua deformação máxima ocorre no instante $t_f = 0,09$ s. Na Eq. (2) \dot{x}_0 é a velocidade inicial. Pode-se observar na Fig. 6 que o deslocamento máximo obtido com este modelo é aproximadamente 100 mm maior que o observado na Fig. 3. Isto indica que a hipótese de aceleração constante e amortecimento linear, relativamente ao deslocamento do veículo, se aproxima dos valores experimentais.

$$F_k(x) = \frac{ma_m}{t_f} \left(\frac{\dot{x}_0}{a_m} - \sqrt{\left(\frac{\dot{x}_0}{a_m}\right)^2 - \frac{2x}{a_m}} \right) \quad (2)$$

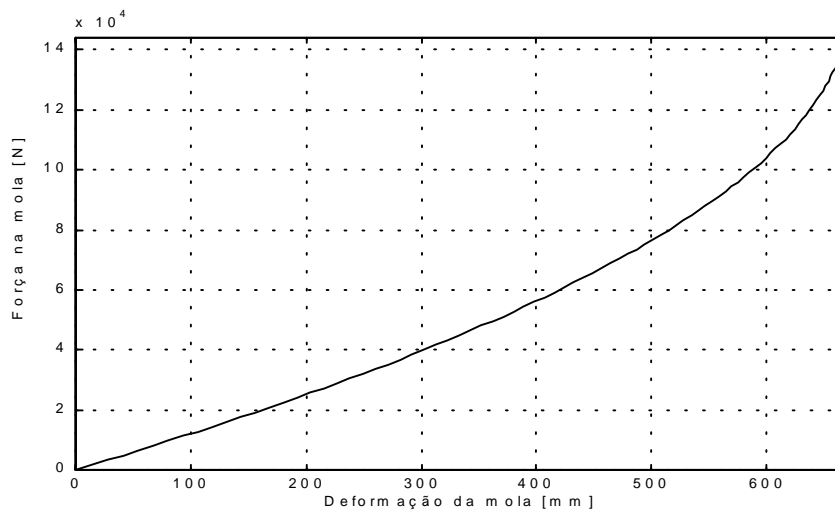


Figura 6 - Relação constitutiva da mola sob a hipótese de aceleração constante.

O pulso real de força que se desenvolve entre a barreira e a superfície frontal do veículo, inicia com o valor zero. Porém, este modelo apresenta um valor de força não nulo no instante inicial $t = 0$ devido ao amortecedor linear como mostra a Fig. 5. Além disso, com este modelo de apenas um grau de liberdade não se pode caracterizar o fenômeno da inversão da aceleração durante a colisão, e conseqüentemente da força resultante, como pode ser observado no gráfico da Fig. 1 entre os instantes 0,01 s e 0,02 s. Fisicamente, o fato ocorre como se o compartimento de passageiros fosse “puxado” de encontro à barreira. Para incluir este comportamento no modelo, necessita-se de mais graus de liberdade, pois isto torna possível o deslocamento relativo entre as massas associadas a eles, permitindo o surgimento de forças que geram a inversão do sinal da aceleração. Por estes motivos procurou-se desenvolver o modelo de maneira a representar melhor o problema.

4. SEGUNDO MODELO PARA A ANÁLISE DO PROBLEMA DE COLISÃO

Para caracterizar qualitativamente a inversão da aceleração durante a colisão utilizou-se um sistema massa-mola-amortecedor de dois graus de liberdade. O modelo físico e o seu grafo de ligação são mostrados na Fig. 7. Não se pretende caracterizar o comportamento não-linear real com este modelo, mas apenas demonstrar que um modelo bastante simples pode reproduzir qualitativamente o comportamento do sistema mais complexo.

Neste modelo a massa total do veículo é representada pelas duas massas que o constituem, sendo a maior parte associada a massa mais afastada da barreira m_1 , que representa o habitáculo e a parte traseira. É nesta parte do veículo real que se obtém a curva da Fig. 1. A outra massa, m_2 , próxima a barreira, representa a massa da parte dianteira, como a estrutura, o motor e as rodas e suspensões dianteiras. Outra característica interessante deste modelo é que na massa m_1 a força inicial associada ao amortecedor é nula, pois no instante $t=0$ as velocidades \dot{x}_1 e \dot{x}_2 são iguais.

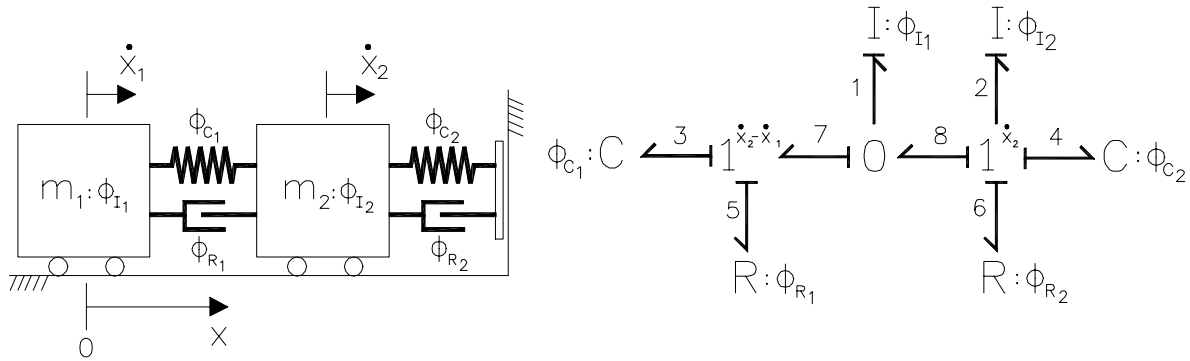


Figura 7 - Modelo de 2 graus de liberdade para o problema de colisão e seu grafo de ligação.

A Eq. (3) é o modelo matemático obtido através do grafo de ligação da Fig. 7. Neste sistema de equações diferenciais de primeira ordem, as variáveis de estado são p_1 e p_2 , quantidades de movimento das massa 1 e 2, e q_3 e q_4 , as deformações das molas 1 e 2. Tanto na Eq. (3) como no grafo de ligação da Fig. 7 as funções ϕ_I , ϕ_C e ϕ_R são respectivamente as relações constitutivas das inércias, dos capacitores (molas) e dos resistores (amortecedores).

$$\begin{aligned}
 \dot{p}_1 &= \phi_{C_1}^{-1}(q_3) + \phi_{R_1}(\phi_{I_2}^{-1}(p_2) - \phi_{I_1}^{-1}(p_1)) \\
 \dot{p}_2 &= -\phi_{C_1}^{-1}(q_3) - \phi_{C_2}^{-1}(q_4) - \phi_{R_2}(\phi_{I_2}^{-1}(p_2)) - \phi_{R_1}(\phi_{I_2}^{-1}(p_2) - \phi_{I_1}^{-1}(p_1)) \\
 \dot{q}_3 &= \phi_{I_2}^{-1}(p_2) - \phi_{I_1}^{-1}(p_1) \\
 \dot{q}_4 &= \phi_{I_2}^{-1}(p_2)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Alguns resultados da simulação deste modelo com as condições iniciais equivalentes ao ensaio de colisão da Fig. 1, ou seja, para uma velocidade de 13,9 m/s (50 km/h) são apresentados a seguir. Estes gráficos foram obtidos através do ajuste dos parâmetros das relações constitutivas dos elementos do grafo de ligação da Fig. 7. Deve-se observar que estes parâmetros foram obtidos através de um procedimento de tentativa e erro, no qual procurou-se apenas aproximar, de melhor forma possível, os resultados experimentais conhecidos. Não se aplicou ainda um procedimento mais rigoroso para determinação dos valores numéricos dos parâmetros, principalmente por que ainda está se verificando qual o modelo físico mais adequado para tratar do problema de colisão, dentro das premissas aqui estabelecidas. O modelo de dois graus de liberdade, com molas e amortecedores em paralelo, ainda não é suficientemente representativo para que se possa investir em procedimentos de identificação paramétrica e análise de sensibilidade.

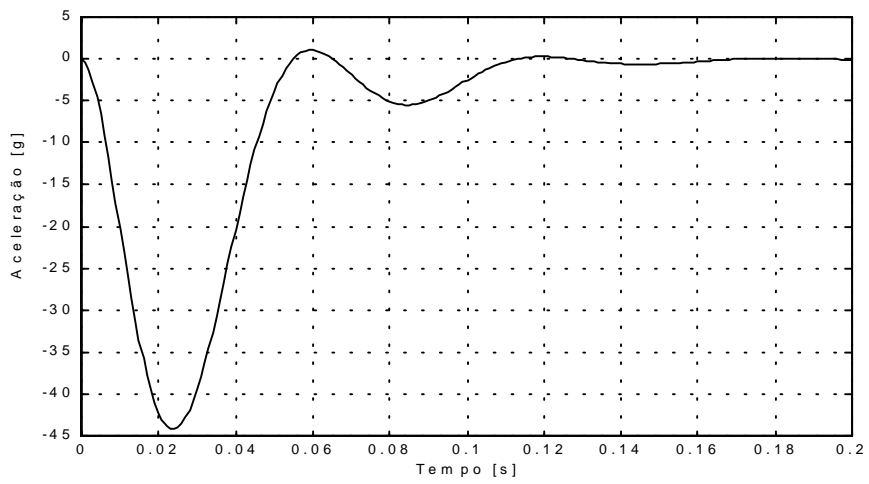


Figura 8 - Aceleração do compartimento de passageiros (massa m_1).

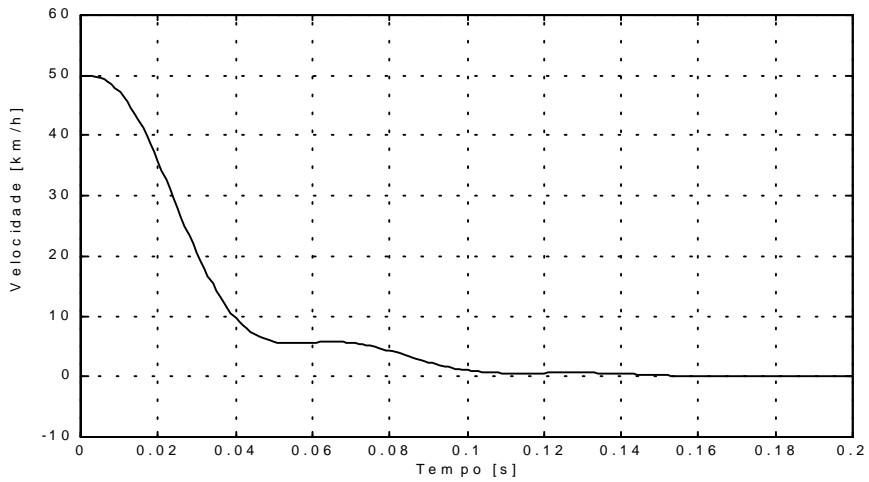


Figura 9 - Velocidade do compartimento de passageiros (massa m_1).

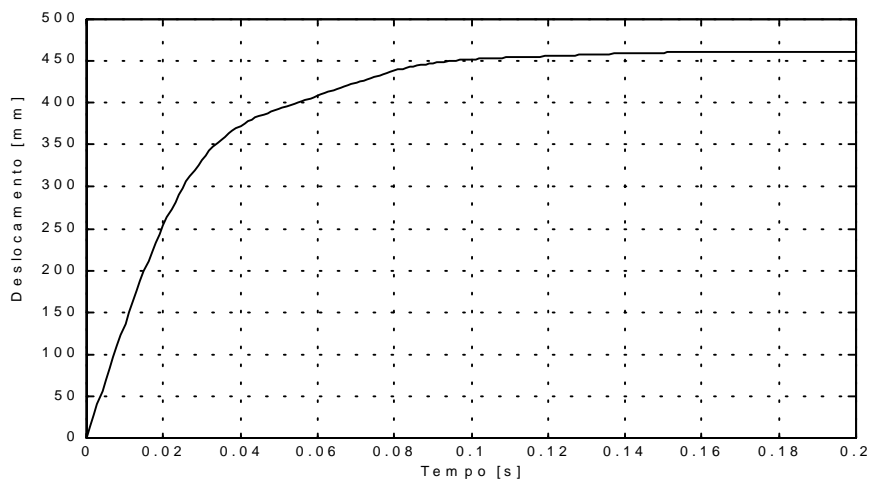


Figura 10 - Deslocamento do compartimento de passageiros (massa m_1).

Como pode ser visto na Fig. 8, na aceleração do compartimento de passageiros existe uma inversão do sinal próximo ao instante 0,06 s, que ocorre antes que a massa atinja o seu deslocamento máximo e a velocidade se anule. Nas Fig. 9 e Fig. 10 apresentam-se os gráficos da velocidade e do deslocamento do compartimento de passageiros. Estas curvas demonstram uma tendência do modelo em reproduzir os resultados experimentais mostrados nos gráficos da Fig. 1, Fig. 2 e Fig. 3. Nestas figuras chama-se atenção para as escalas de tempo estendidas para 0,02 s de simulação, em contraste com os gráficos experimentais cujas escalas terminam em 0,01 s, o que foi feito a fim de melhor verificar o que ocorria com o sistema em regime.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi dito anteriormente, o trabalho de se desenvolver modelos simples que consigam reproduzir com boa precisão os fenômenos físicos envolvidos em colisões está apenas começando. Estes modelos serão úteis na previsão das desacelerações em colisões de um veículo particular, que se queira analisar, uma vez que deve existir uma repetibilidade em ensaios feitos sob as mesmas condições.

Os modelos apresentados aqui não são suficientes ainda para este fim, mas permitem um primeiro contato com os parâmetros envolvidos no problema. Por exemplo, o segundo modelo proposto, embora muito simples, já apresenta uma resposta qualitativamente de acordo com o modelo real. Porém, o primeiro modelo não se mostrou adequado para incorporar as características do problema. Por exemplo, foi ressaltado anteriormente que o pulso da força de impacto entre a barreira e o veículo, embora seja de pequena duração e apresente grandes valores médios, não fica bem caracterizado por este modelo.

Ainda são necessários desenvolvimentos na estrutura do modelo, e também na sua identificação paramétrica. Além disso, em futuros desenvolvimentos, ainda buscando modelos simples, pretende-se utilizar modelos elasto-plásticos como proposto por (Speranza e da Silva, 1997) para representar a estrutura dianteira do veículo. Isto permitirá comparar os resultados com a abordagem utilizada neste trabalho, onde os efeitos de acumulação de energia por deformação plástica nos materiais foi representado pela energia dissipada no amortecedor. Obtendo-se um modelo simples para representar a física do problema será possível acoplar vários elementos deste tipo para montar modelos maiores representando toda a estrutura do veículo de uma forma discreta e simplificada. Como ilustração, o modelo mostrado na Fig. 11 poderá ser utilizado na simulação de colisões em que apenas os pára-choques sejam afetados, mesmo em condições excêntricas (“off-set”).

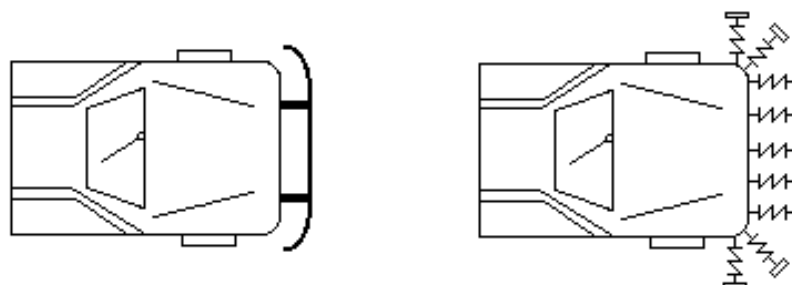


Figura 11 - Modelo de pára-choque composto de elementos discretos.

REFERÊNCIAS

- Fenton, J., 1996, Handbook of Vehicle Design Analysis, SAE.
- Madureira, O. M. M., 1998, Curso de Segurança Veicular, Associação Brasileira de Engenharia Automotiva.
- Marzougui, D., Kan, C. D. and Bedewi, N. E., 1996, Development and Validation of an NCAP Simulation using LS-DYNA3D, Fourth International LS-DYNA3D Conference, Cray Research, pp. 319-332.
- Speranza Neto, M. e da Silva, F. R., 1997, The Dynamic Behavior of Elastic-Plastic Materials Modeled by Bond Graphs, XIV Diname.
- Zaouk, A. K., Bedewi, N. E., Kan, C. D. and Marzougui, D., 1996, Development and Evaluation of a C-1500 Pick-Up Truck Model for Roadside Hardware Impact Simulation, Presented in the FHWA Simulation Conference.

A MODEL OF COLLISION OF A GROUND VEHICLE WITH FLEXIBLE STRUCTURE

***Abstract.** In this work we show the development of a simplified model for the computational simulation of the collision of a ground vehicle taking in consideration the dynamic deformations that occur during the shock. Starting from experimental results from crash-tests the acceleration of the vehicle is simulated in commercial programs. The work is illustrated with the results obtained until this moment with this model that are compared with some information found in the literature.*

***Keywords:** Vehicle Dynamics, Crash-Test, Frontal Impact*