



DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO CAPAZ DE PREVER O AMORTECIMENTO DE IMPACTO REALIZADO POR UM AIRBAG MOTORISTA

MARINA ULISSES DA SILVA, RUDOLF HUEBNER

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil

(Recibido 18 de mayo de 2019, para publicación 12 de noviembre de 2019)

Resumo – Dezenas de novos modelos de veículos são lançados anualmente, para cada um deles é necessário o desenvolvimento ou, no mínimo a calibração de um novo sistema de retenção do ocupante (ORS), sistema do qual o *airbag* motorista faz parte. O desenvolvimento, otimização e validação do ORS é um processo complexo e dispendioso. Assim, a simulação numérica é essencial nas etapas iniciais e intermediárias do desenvolvimento dos *airbags* para minimizar o tempo e o alto custo associado a testes experimentais. De modo geral, as simulações virtuais utilizadas na indústria automotiva demandam considerável esforço computacional, tempo de simulação e muitas vezes mão-de-obra especializada. Assim, tendo em vista a crescente necessidade de avaliar o comportamento dos *airbags* de maneira rápida e a baixo custo este trabalho visa desenvolver um modelo capaz de descrever de maneira satisfatória a interação entre um *airbag* motorista e o ocupante utilizando conceitos de mecânica clássica. O modelo foi implementado em linguagem de MATLAB a fim de que os resultados fossem obtidos de maneira rápida através do método iterativo. Algumas considerações foram feitas para simplificação do fenômeno: o gás no interior do *airbag* foi considerado um gás ideal, assumiu-se que o *airbag* é simétrico e que todas as deformações sofridas também se propagam de maneira simétrica, a compressão do gás no interior da bolsa ocorre adiabaticamente e a distribuição de temperatura em seu interior é uniforme. O modelo desenvolvido foi correlacionado com o modelo de Zhang et al com desvio menor que 6% se mostrando eficiente para prever o comportamento do *airbag* quando a interação entre a bolsa e o ocupante ocorre após o *airbag* está completamente inflado e posicionado.

Palavras-chave – Sistema de retenção do ocupante, *airbag* motorista, modelo teórico de *airbag*, amortecimento por *airbag*.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Plano Global para a Segurança nas Estradas divulgado pela Organização Mundial de Saúde, OMS, as mortes causadas direta ou indiretamente por acidentes de trânsito estão na casa de 1.3 milhões de pessoas por ano, o que corresponde a 3000 mortes a cada dia [1]. Os acidentes veiculares são a principal causa de morte dos jovens entre 15 e 29 anos de idade, na frente das mortes em decorrência de suicídio, HIV e homicídios [2]. Adicionalmente, mais de 20 milhões de pessoas carregam sequelas de colisões não fatais. E as consequências econômicas dessas colisões estão estimadas entre 1% e 3% do produto interno bruto dos países [1]. Diante deste cenário, é incentivado mundialmente a implementação de tecnologias que melhore a segurança dos veículos visando diminuir os impactos decorrentes de acidentes. Neste contexto, os *airbags*, como parte integrante do sistema de retenção do ocupante, ganharam maior visibilidade mundial tornando-se legislados em muitos países.

Os *airbags* são compostos por uma bolsa de tecido que infla rapidamente quando o *airbag* é acionado e se interpõe entre o ocupante e as partes rígidas do veículo funcionando como uma almofada que dissipa a energia cinética da colisão e distribui as forças do impacto sobre a cabeça e o tórax dos ocupantes. Eles são dotados de furos de exaustão de gás cuidadosamente dimensionados para que o gás de preenchimento da

bolsa seja sutilmente esvaziado após a colisão de modo a permitir uma desaceleração controlada das partes do corpo do ocupante à medida que o *airbag* se esvazia.

O *airbag* do motorista é o dispositivo de segurança que, em caso de colisão frontal, se interpõem entre o volante e o condutor evitando o contato rígido entre o motorista e o volante e em consequência reduzindo os riscos de lesão na cabeça e no tórax.

O desenvolvimento de um sistema de *airbags* é um processo desafiador principalmente por contar com a necessidade de compreender como o sistema interage com o ocupante em diferentes situações de colisão possíveis no mundo real. Diante da numerosa quantidade de cenários que precisam ser analisados a simulação numérica é essencial nas etapas iniciais e intermediárias do desenvolvimento para minimizar o alto impacto de tempo e custo associados a testes experimentais.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático capaz de prever o processo de amortecimento de impacto realizado por um *airbag* motorista por meio da simulação do processo de exaurimento de gás da bolsa. Para desenvolvimento do modelo foram utilizados conceitos de mecânica clássica e as equações obtidas foram implementadas em linguagem MATLAB para serem resolvidas pelo método iterativo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Marcklund *et al.* [3], desde o início dos anos 70 muitos pesquisadores têm estudado e proposto métodos para simulação do escoamento de gás nos *airbags* baseados na abordagem euleriana e no conceito de volume de controle (CV). Embora os algoritmos tenham evoluído consideravelmente ao longo dos anos, o método CV ainda é a base de simulação empregada nos programas comerciais. Por exemplo, o MADYMO é o programa comercial mais utilizado na indústria automotiva para simulação, análise e otimização de projeto de sistema de segurança ao ocupante combinando em um único solver tecnologia multiorpos, elementos finitos e CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Sua grande vantagem é o fato de que o MADYMO conta com uma enorme variedade de modelos de corpo humano em sua base de dados. Com a disponibilidade de uma ampla gama de tamanhos e posições os modelos humanos em MADYMO é possível representar de maneira satisfatória as respostas do corpo humano em diversas situações de colisão e também em cenários de não-colisão [4]. A grande desvantagem do programa está no alto custo de licença, no tempo de simulação, além da necessidade de computadores de alto desempenho.

O LS-DYNA também é outro programa amplamente utilizado nas indústrias automobilística, aeroespacial, de construção civil e militar. Apresenta bastante precisão para simular tanto condições não lineares, em que as condições de contorno variam ao longo do tempo, quanto problemas transientes, em que os fenômenos ocorrem em alta velocidade e em intervalos de tempo curtos [5].

Em suma, os métodos de simulação utilizados pela indústria exigem considerável esforço computacional, tempo de simulação e muitas vezes mão-de-obra especializada. Tendo em vista a crescente necessidade de avaliar o comportamento dos *airbags* de maneira rápida e a baixo custo, pesquisadores vêm trabalhando em modelos simplificados capazes de descrever de maneira satisfatória a interação entre o *airbag* e o ocupante.

Aplicando o princípio fundamental da dinâmica de Newton, a lei dos gases ideais e o teorema do momento linear, Zhang *et al.* [6] desenvolveu um algoritmo simplificado capaz de descrever de maneira satisfatória a interação entre um *airbag* motorista e o condutor. O algoritmo foi implementado e resolvido de forma iterativa em linguagem de MATLAB. Em seu experimento Zhang *et al.* [6] variou a área do furo de exaustão de gás e a massa de gás no interior do *airbag* no instante inicial. A mesma simulação foi realizada utilizando o programa comercial MADYMO versão 7.4 e a correlação entre o modelo desenvolvido e o programa comercial se mostrou muito boa na maioria dos casos. O modelo de *airbag* motorista de Zhang *et al.* [6] tem a forma de um esferóide oblato quando está completamente inflado.

Os sistemas de amortecimento com o auxílio de *airbags* são também empregados na indústria aeronáutica e aeroespacial desde os anos 60. Por exemplo, eles amortizam o pouso de fardos lançadas a partir de aviões garantindo a integridade das cargas ao atingir o solo. Wen *et al.* [7] desenvolveu um algoritmo simplificado para descrever a aterrissagem de cargas lançadas a partir de aviões suavizada devido a uma bolsa de *airbag* que infla antes do pouso.

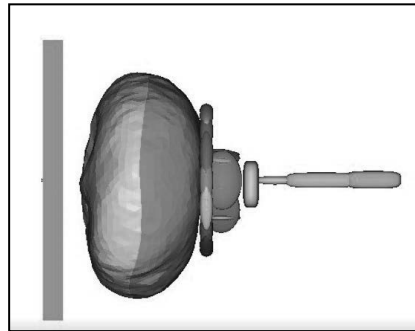


Fig. 1. Ilustração da aproximação da interação entre o motorista e o *airbag* por uma placa plana e por um esferóide oblato.

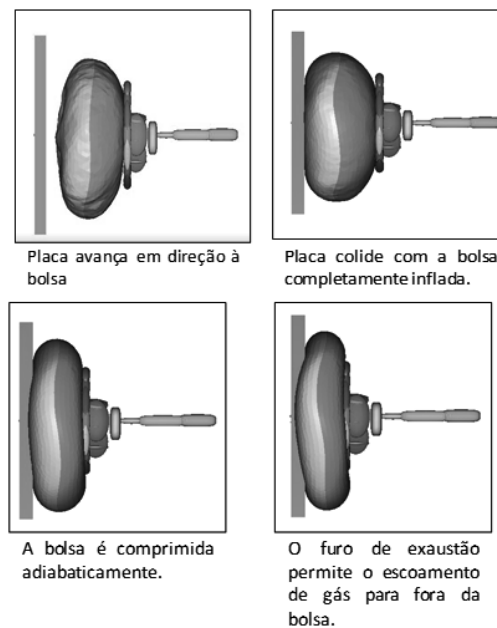


Fig. 2. Compressão do *airbag* ao passo que a placa avança em direção à bolsa.

3. METODOLOGIA

Para facilitar o desenvolvimento das equações e possibilitar a correlação do modelo com resultados da literatura a interação entre o motorista e o *airbag* será aproximada pela situação ilustrada na Fig.1. O motorista será aproximado por uma placa plana de massa 25 kg que avança em direção ao *airbag*; o qual, por sua vez, será aproximado por um esferóide oblato originado da junção de dois painéis circulares de 635 mm de diâmetro e com volume máximo aproximado de 45 dm³ no instante em que o *airbag* se encontra 100% cheio de gás e posicionado.

O instante inicial que será considerado para o desenvolvimento dos cálculos é o momento imediatamente anterior à colisão entre o *airbag* e a placa sendo que nesse instante o *airbag* está completamente inflado e posicionado. À medida que a placa plana se desloca horizontalmente em direção ao *airbag* os furos de exaustão da bolsa se abrem permitindo o escoamento de gás para fora do *airbag*. Nessa ocasião a bolsa é comprimida adiabaticamente. A Fig. 2 ilustra a compressão do *airbag* ao passo que a placa avança.

Com o intuito de simplificar a modelagem matemática do fenômeno foram feitas as considerações abaixo:

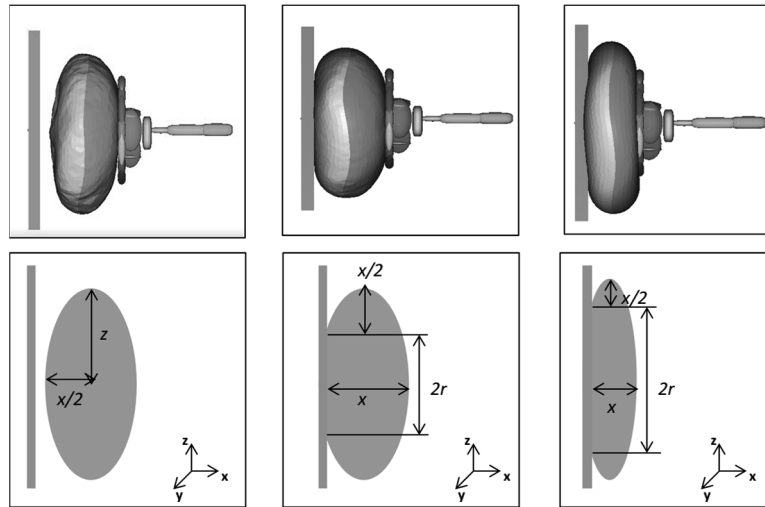


Fig. 3. Ilustração da seção transversal da bolsa do *airbag* à medida que a placa avança. A seção transversal representa tanto o corte no plano xz , quanto no plano yz uma vez que a deformação do *airbag* é uniforme.

1. A placa plana avança horizontalmente e a deformação da bolsa do *airbag* é simétrica ao entrar em contato com a mesma.
2. A compressão do gás no interior da bolsa ocorre adiabaticamente, sem atrito e sem perda de calor, e a distribuição de temperatura no interior da bolsa é uniforme.
3. A bolsa possui um furo de exaustão de gás com área constante.
4. A composição do gás que preenche o *airbag* se aproxima de um gás ideal monoatômico.

Devido à consideração de deformação simétrica em todas as direções, durante o impacto com a placa plana, a área de contato entre a placa e o *airbag* é um círculo cujo raio aumenta à medida que a placa avança. A Fig. 3 ilustra a seção transversal da bolsa nos planos xz e yz com decorrer do tempo.

Onde: $x = f(t)$ representa o eixo secundário do esferóide oblato, $z = f(t)$ representa o eixo principal do esferóide oblato e $r = f(t)$ representa o raio do círculo em contato com a placa plana.

O volume da bolsa em qualquer instante pode ser determinado através do segundo teorema de Pappus-Guldin e está representado na Equação 1.

$$V_{Total} = 2\pi \left[\frac{x^3}{12} + \left(\frac{r^2 x}{2} \right) \right] \quad (1)$$

3.1. Equação do gás ideal

Uma vez estabelecida a consideração de que o gás no interior da bolsa tem comportamento de gás ideal é possível aplicar a Equação 2 que varia com o tempo.

$$P = \frac{mRT}{V} \quad (2)$$

Em que: $P = f(t)$ representa a pressão dentro da bolsa a cada instante, $V = f(t)$ representa o volume dentro da bolsa a cada instante, $m = f(t)$ representa a massa de gás dentro da bolsa a cada instante, T corresponde a temperatura do gás dentro da bolsa e R corresponde a constante dos gases ideais para o nitrogênio.

3.2. Equação do perímetro da seção transversal

O perímetro da seção transversal do *airbag* é constante em qualquer instante e vale $2D$ onde D é o diâmetro do painel circular que deu origem à bolsa do *airbag*. A Fig. 4 permite verificar que a Equação 3 representa o perímetro da seção transversal da bolsa a cada instante.

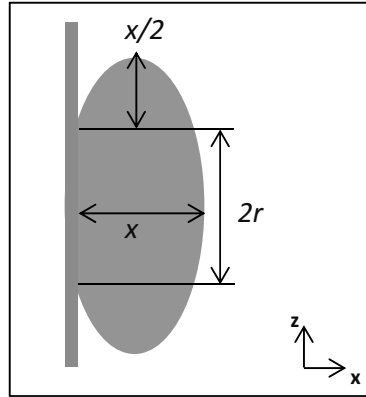


Fig. 4. Esquema das dimensões da seção transversal da bolsa.

$$2D = 4r + x\pi \quad (3)$$

$$r = \frac{D}{2} - \frac{x\pi}{4} \quad (4)$$

Em que: $x = f(t)$ e $r = f(t)$ são as dimensões da bolsa a cada instante.

3.3. Equação da vazão de gás para fora da bolsa

A Equação 5 representa a massa de gás que atravessa as fronteiras da bolsa através do furo de vazão em um intervalo de tempo infinitesimal.

$$dm = \rho w dt \quad (5)$$

$$dm = A \frac{P}{RT} w dt \quad (6)$$

Em que: A representa a área do furo de vazão, $\rho = f(t)$ representa a densidade do gás a cada instante, w representa a velocidade com que o gás atravessa o furo de vazão, $P = f(t)$ representa a pressão dentro da bolsa em cada instante, T corresponde a temperatura do gás dentro da bolsa e R corresponde a constante dos gases ideais para o nitrogênio.

A variação da quantidade de movimento linear de um corpo é igual ao impulso da força resultante que atua sobre ele. Para o caso da exaustão de gás do airbag através das fronteiras do furo de vazão, a força que a pressão resultante do gás dentro da bolsa exerce na área do furo em um intervalo de tempo infinitesimal é igual ao produto entre a massa de gás que deixa a bolsa pela velocidade com a qual ela atravessa o furo, conforme indicado na Equação 7.

$$w dm = (P - P_{atm})A dt \quad (7)$$

Dividindo a Equação 7 pela Equação 6 é possível determinar a velocidade com a qual o gás deixa a bolsa através do furo de vazão.

$$w = \sqrt{\frac{(P - P_{atm})}{P} RT} \quad (8)$$

Substituindo a Equação 8 em Equação 6 chega-se na Equação 9 que determina a massa de gás dentro da bolsa a qualquer momento como uma função do tempo.

$$m_{t_{n+1}} = m_{t_n} - \Delta t A \frac{P}{RT} \sqrt{\frac{(P - P_{atm})}{P} RT} \quad (9)$$

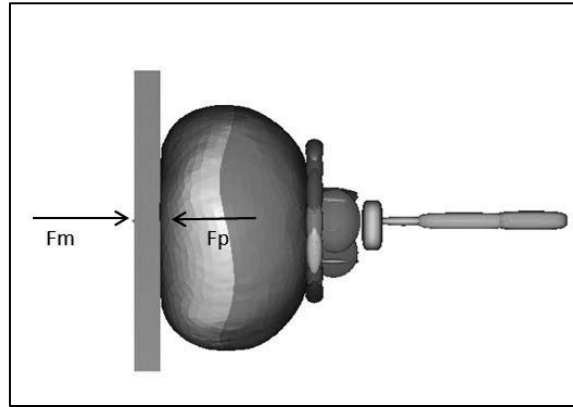


Fig. 5. A placa plana exerce uma força contra a superfície do *airbag* em contato com ela à medida que avança.

3.4. Equação do avanço da placa em direção à bolsa

A cada intervalo de tempo infinitesimal o balanço de forças do sistema obedece à segunda lei de Newton. Assim, a força resultante sobre o sistema é dada pelo produto da massa da placa pela desaceleração a qual ela fica submetida após entrar em contato com o *airbag* conforme indicado na Equação 10.

$$a = \frac{-(P - P_{atm})\pi r^2}{M} \quad (10)$$

Em que: $a = f(t)$ representa a desaceleração da placa a cada instante, M representa a massa da placa plana, P_{atm} representa a pressão atmosférica, $P = f(t)$ representa a pressão dentro da bolsa em cada instante e $r = f(t)$ representa o raio da área de contato entre a bolsa e placa a cada instante.

3.5. Equações da velocidade e da aceleração

Num intervalo de tempo infinitesimal o movimento da placa em direção à bolsa pode ser considerado um movimento retilíneo uniformemente desacelerado em que as equações da mecânica clássica são aplicáveis. Deste modo, o caminho percorrido pela placa num intervalo de tempo Δt é representado pela Equação 11. Sendo x a intrusão da placa sobre o *airbag*.

$$x_{t_{n+1}} = x_{t_n} - \Delta x \quad (11)$$

A velocidade da placa a cada instante é expressa pela Equação 12.

$$v_{t_{n+1}} = v_{t_n} + a_{t_{n+1}}\Delta t \quad (12)$$

3.6. Sistema de equações

Todo o desenvolvimento matemático realizado até este ponto possibilita montar o sistema de equações sequenciais, Equação 13, que pode ser implementado em linguagem de MATLAB e resolvido a partir de valores iniciais de forma iterativa.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{t_{n+1}} = m_{t_n} - \Delta t A \frac{P_{t_n}}{RT} \sqrt{\frac{(P_{t_n} - P_{atm})}{P_{t_n}}} RT \\ x_{t_{n+1}} = x_{t_n} - v_{t_n} \Delta t - \frac{a_{t_n}}{2} \Delta t^2 \\ r_{t_{n+1}} = \frac{D}{2} - \frac{x_{t_{n+1}} \pi}{4} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{t_{n+1}} = 2\pi \left[\frac{(x_{t_{n+1}})^3}{12} + \frac{(r_{t_{n+1}})^2 x_{t_{n+1}}}{2} \right] \\ P_{t_{n+1}} = \frac{m_{t_{n+1}} RT}{V_{t_{n+1}}} \\ a_{t_{n+1}} = \frac{-(P_{t_{n+1}} - P_{atm}) \pi (r_{t_{n+1}})^2}{M} \\ v_{t_{n+1}} = v_{t_n} + a_{t_{n+1}} \Delta t \end{array} \right. \quad (13)$$

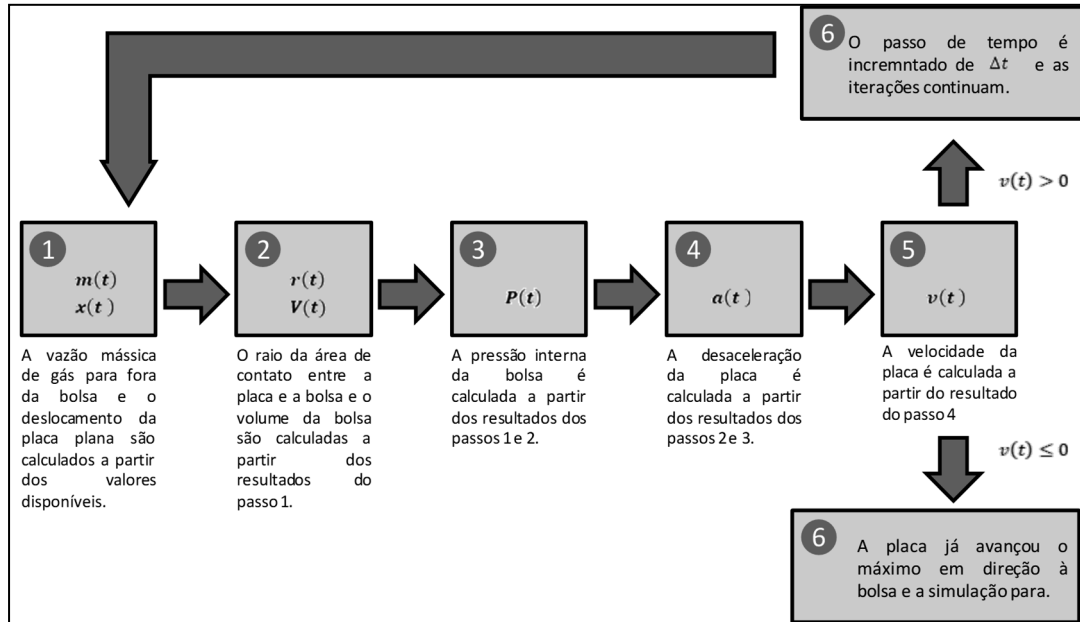


Fig. 5. Esquema do fluxo de dados para a resolução do sistema de valor inicial da Equação 13.

Tabela 1. Lista de constantes do sistema de equações Equação 13.

| Símbolo | Constante | Valor |
|-----------|---|--------------------|
| C_p | Capacidade calorífica do nitrogênio a pressão constante | 1057,1 [J/(K.kg)] |
| T | Temperatura do gás no interior da bolsa [6] | 500 [K] |
| R | Constante universal do gás ideal para o nitrogênio | 296,928 [J/(K.kg)] |
| M | Massa da placa plana | 25 [kg] |
| P_{atm} | Pressão atmosférica | 101325 [Pa] |
| D | Diâmetro do painel circular que deu origem à bolsa do <i>airbag</i> | 0,635 [m] |

Tabela 2. Lista de valores iniciais para resolver de forma iterativa o sistema Equação 13.

| Símbolo | Variável | Valor Inicial |
|---------|---|-----------------------|
| m | Massa de gás dentro da bolsa | 0,04 [kg] |
| P | Pressão interna da bolsa | 304397 [Pa] |
| a | Desaceleração da placa plana | 0 [m/s ²] |
| v | Velocidade da placa plana | 6 [m/s] |
| r | Raio da área de contato entre a bolsa e a placa | 0 [m] |
| x | Eixo secundário do esferoide oblato | 0,435 [m] |

A Fig. 5 representa o esquema do fluxo de dados em que o problema deve ser resolvido. As tabelas 1 e 2 contêm, respectivamente, a descrição das constantes e dos valores iniciais utilizados no problema iterativo. O passo de tempo utilizado foi de 1 ms. Intervalos menores poderiam ter sido utilizados, entretanto resultariam num maior número de iterações e maior esforço computacional. Uma vez acionado, a bolsa do *airbag* leva, em média, 35 ms para estar completamente cheia e o processo de exaurimento de gás não demora mais que 70 ms. Dessa forma, passos de tempo da ordem de 5 ms já resultam em baixa precisão nos resultados encontrados para o pico de desaceleração.

3.7. Avaliação dos parâmetros que influenciam a desaceleração e o deslocamento da placa

Para efeitos de avaliação de segurança do ocupante em caso de colisão frontal, os parâmetros biomecânicos mais importantes relacionados ao *airbag* são a desaceleração máxima sofrida pela cabeça e o contato rígido entre o motorista e o volante. A desaceleração sofrida pela placa plana é influenciada pelo diâmetro do furo de exaustão de gás da bolsa do *airbag* e pela massa de gás dentro da bolsa no instante imediatamente anterior à colisão. A distância final entre a placa plana e o volante após o processo de amortecimento foi medida a fim de se avaliar o risco de contato rígido entre o motorista e o volante.

Um total de 20 simulações foram realizadas onde as massas iniciais de gás dentro da bolsa foram estabelecidas em 0,035 Kg, 0,040 Kg, 0,045 Kg e 0,050 Kg. Para cada condição de massa inicial de gás dentro da bolsa foram avaliados furo de vazão de 0,015 mm, 0,020 mm, 0,025 mm, 0,030 mm, 0,035 mm e 0,040 mm.

4. RESULTADOS

4.1. Validação do modelo

Para validação do modelo, os dados de saída foram comparados com os dados obtidos pelo modelo de Zhang [6]. Em seu trabalho publicado no *Chinese Journal of Mechanical Engineering* e intitulado *Establishment and Validation for the Theoretical Model of the Vehicle Airbag*, Zhang *et al* desenvolve um modelo a partir do princípio da conservação de energia e da lei dos gases ideais e correlaciona seus resultados com simulações obtidas a partir do programa MADYMO. O modelo de Zhang *et al.* demonstrou ser preciso para simular o amortecimento por meio de um *airbag* motorista com desvio da ordem de 5% para o cálculo do pico de desaceleração na grande maioria das simulações avaliadas em seu trabalho [6]. A fim de comparar os dois modelos foram utilizados massa inicial de gás dentro da bolsa e furo de exaustão de gás iguais a 0.04 kg e 0.035 mm respectivamente, esses parâmetros foram escolhidos uma vez que apresentam correlação com os resultados obtidos em Madymo com desvio de 1.5%.

A tabela 3 compara os picos de desaceleração obtidos através do modelo de Zhang e do modelo desenvolvido nesse trabalho nas condições descritas no parágrafo anterior. O desvio entre os dois modelos é menor que 6%.

Tabela 3. Comparação dos picos de desaceleração entre os modelos de Zhang e Marina para um furo de exaustão de gás de 0,035 mm e massa inicial de gás de 0.040 kg.

| | Desaceleração máxima | | |
|-----------------------|----------------------|---------------------|--------|
| | Modelo Zhang | Modelo Marina | Desvio |
| Massa de gás 0.040 kg | | | |
| Ø furo 0,035 mm | -19 g após 70ms | - 20,13 g após 69ms | 5,95% |

4.2. Influência da variação do furo de exaustão sobre a desaceleração da placa

No dimensionamento de *airbags* o furo de exaustão de ar é o parâmetro mais comumente utilizado para ajustar a rigidez da bolsa a fim de obter respostas biomecânicas satisfatórias. Quando a desaceleração sofrida pelo ocupante é muito alta, entende-se que o *airbag* está muito rígido; nesse caso, aumentar o diâmetro ou a quantidade dos furos de exaustão de gás ajuda a diminuir a rigidez da bolsa e de consequência a desaceleração sofrida pelo ocupante. A variação do *output* do gerador de gás, medida através da pressão máxima fornecida por ele, ou da massa inicial de gás dentro da bolsa quando ela está completamente inflada é outro parâmetro que pode ser variado a fim de obter respostas biomecânicas satisfatórias.

Tendo em vista a importância dos furos de exaustão de ar para a calibração dos *airbags*, existe uma preocupação muito grande em se certificar de que a performance de um *airbag* é sensível a variações de furo de exaustão nas etapas mais iniciais do projeto.

Os gráficos das Figs. 6 a 9 mostram como a desaceleração da placa plana varia ao longo do tempo em função do diâmetro do furo de exaustão de gás para diversas condições iniciais de massa de gás dentro do *airbag* utilizando o modelo desenvolvido neste trabalho. Em todas as condições de massa inicial de gás dentro da bolsa ao passo em que o diâmetro do furo de exaustão aumenta os picos de desaceleração são mais suaves, indicando que a bolsa está mais macia e que o amortecimento do impacto se dá mais lentamente. Fixando a massa inicial de gás dentro da bolsa é possível notar que ao aumentar o furo de exaustão de 0,015 mm para 0,040 mm o pico de desaceleração da placa cai em cerca de 19 g para todas as condições de massa inicial de gás dentro da bolsa.

Para a condição de massa inicial de gás dentro da bolsa igual a 0,035 Kg e furo de exaustão de gás de 0,040 mm a equação não convergiu, por isso esse resultado não está representado na Fig. 6.

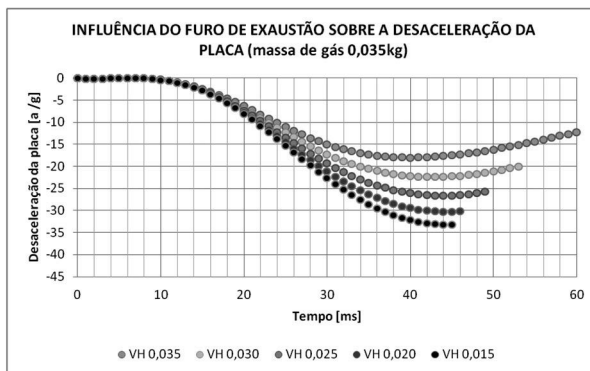


Fig. 6. Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0,035 kg.

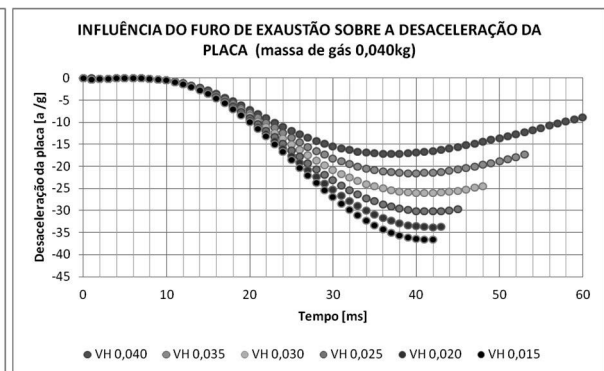


Fig. 7. Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo.

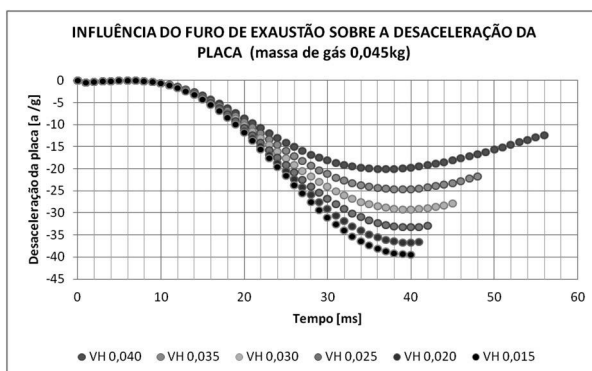


Fig. 8. Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0,045 kg.

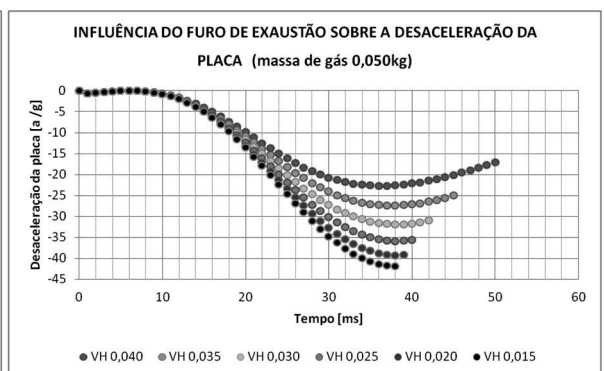


Fig. 9. Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0,050 kg.

4.3. Influência da variação do furo de exaustão sobre o deslocamento da placa

A tabela 4 ilustra como o furo de vazão de gás influencia na distância final mínima entre volante e placa para diversas condições de massa inicial de gás dentro da bolsa. É possível observar que a distância final entre volante e ocupante aumenta no mesmo sentido em que a desaceleração aumenta. A fim de otimizar a performance do *airbag* é necessário encontrar um meio termo entre desaceleração máxima da cabeça e proximidade/risco de contato direto entre o volante e o ocupante. Para a condição de massa inicial de gás dentro da bolsa igual a 0,035 Kg e furo de exaustão de gás de 0,040 mm a equação não convergiu, por isso esse resultado não está representado na tabela 4.

Como legislação, a fim de atender a CONTRAN 201 [8], a desaceleração da cabeça não pode ultrapassar 80g num intervalo de tempo de 3 ms; entretanto, a fim de alcançar resultados de performance biomecânica de padrões de segurança internacional cada vez mais rigorosos busca-se trabalhar com desacelerações menores que 50 g.

Tabela 4. Influência do furo de vazão a distância final mínima entre volante e ocupante após o processo de amortecimento pelo *airbag*.

| Distância mínima do volante | | Diâmetro do furo de Exaustão (mm) | | | | | |
|-----------------------------|-------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,015 | 0,020 | 0,025 | 0,030 | 0,035 | 0,040 |
| Massa de Gás (kg) | 0,035 | 228,37 | 223,76 | 217,02 | 206,78 | 189,52 | - |
| | 0,040 | 240,34 | 236,56 | 231,15 | 223,3 | 211,21 | 188,31 |
| | 0,045 | 249,46 | 246,25 | 241,63 | 235,17 | 225,72 | 210,27 |
| | 0,050 | 259,71 | 253,89 | 249,87 | 244,33 | 236,48 | 224,51 |

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram utilizados conceitos de mecânica clássica para desenvolver um modelo matemático capaz de simular o amortecimento de impacto realizado por um *airbag* motorista de maneira rápida e eficiente. O modelo foi, em seguida, implementado em linguagem de MATLAB a fim de que os resultados fossem obtidos de maneira rápida e eficiente.

O sistema em avaliação foi definido como a bolsa do *airbag* completamente inflada e uma placa plana que avança em direção à bolsa representando o comportamento de um ocupante em uma condição real de colisão.

Algumas considerações e simplificações foram adotadas: o gás no interior do *airbag* foi considerado um gás ideal. Assumiu-se que o *airbag* é simétrico e que toda a deformação sofrida por ele ao passo em que ele entra em contato com a placa plana também se propagam de maneira simétrica. A compressão do gás no interior da bolsa ocorre adiabaticamente e a distribuição de temperatura no interior da bolsa é uniforme.

O modelo desenvolvido foi correlacionado com o modelo de Zhang *et al.* [6] com desvio menor que 6% se mostrando eficiente para prever o pico de desaceleração sofrida pela placa e também sua intrusão no *airbag* para situações em que o contato *airbag* – placa ocorre quando a bolsa já está completamente inflada e posicionada. O modelo não é capaz de prever o comportamento do *airbag* quando a interação entre a bolsa e a placa ocorre antes que o *airbag* esteja completamente inflado.

Foram avaliadas algumas configurações de *airbag* compatíveis com as variações disponíveis no mercado. Os parâmetros variados foram diâmetro do furo de exaustão de gás e massa inicial de gás dentro da bolsa. Em todas as configurações avaliadas a desaceleração da placa plana se mostrou sensível a variações de diâmetro do furo de exaustão. Em todas as condições o pico de desaceleração foi inferior a 50 g e não houve contato rígido entre a placa e volante. Deste modo, todas as configurações avaliadas potencialmente poderiam ser aprovadas do ponto de vista dos requisitos mínimos legislativos. Entretanto, apenas com essa avaliação não é possível determinar qual a configuração ideal do *airbag*. Para identificação da configuração

ideal recomenda-se que sejam realizados testes experimentais com a condição de menor massa inicial de gás dentro da bolsa (0,035 Kg) pois, quanto menor a massa inicial de gás menor a carga propelente do gerador de gás e de conseqüência menor o custo associado ao *airbag*. Além disso, os teste experimentais mostrarão a resposta biomecânica de maneira mais assertiva.

O modelo foi desenvolvido para prever o comportamento de um *airbag* motorista em forma de um esféroide oblato; entretanto, feitos os devidos ajustes de geometria e de parâmetros o mesmo pode ser utilizado para descrever o comportamento de outros tipos de *airbag*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] World Health Organization. Decade of Action for Road Safety 2011–2020 Saving millions of lives.
- [2] World Health Organization. Relatório Global sobre o estado da segurança viária 2015.
- [3] Marklund, P.O., Nilsson L., “Simulation of airbag inflation processes using a coupled fluid structure approach”, *Computational Mechanics*, 29, 289–297 (2002)
- [4] TASS International. Cost-effective safety design programa. Acesso em: 05/04/2019. Disponível em: <https://tass.plm.automation.siemens.com/madymo>.
- [5] Livermore Programa Technology Corporation (LSTC). LS- DYNA. Acesso em: 05/04/2019. Disponível em: <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>
- [6] Zhang, J., Jin, Y., Xie, L., Chen, C., “Establishment and Validation for the Theoretical Model of the Vehicle Airbag”, *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, 28(3,a) (2015)
- [7] Wen, J., Li, B., Yang, Z., “Study on cushioning characteristics of soft landing airbag with elastic fabric”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 33, 1535–1545 (2010)
- [8] Conselho Nacional De Trânsito. Resolução CONTRAN N° 221, de 11 de janeiro de 2007. Acesso em: 06/04/2018. Disponível em: http://new.denatran.gov.br/download/Resolucoes/RESOLUCAO_221.pdf.
- [9] ABNT. ABNT NBR 15300 - 1 - Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante - ensaios de impacto frontal. Parte 1: Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro – RJ. 2005.
- [10] ABNT. ABNT NBR 15300 - 2 - Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante- ensaios de impacto frontal. Parte 2: Procedimentos de ensaio de impacto frontal com 100% de sobreposição. Rio de Janeiro – RJ. 2005.
- [11] ABNT. ABNT NBR 15300 – 3 - Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante - ensaios de impacto frontal. Parte 3: Procedimentos de ensaio de impacto frontal com 40% de sobreposição. Rio de Janeiro – RJ. (2005)
- [12] Bendjaballah *et al.*, “Numerical analysis of side airbags deployment in out-of-position situations”, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 12(12) (2017)
- [13] Conselho Nacional DE Trânsito. Resolução CONTRAN N° 312, de 03 de abril de 2009
- [14] ESI – GROUP. Eberhard Haug, Co-founder of ESI Group, speaks about the origins of PAM-CRASH, ESI’s first flagship programa, and recount tales of ESI’s first car crash simulation for Volkswagen, in 1985
- [15] Happee, R., Rekveldt, M., Schoenmakers, F., “Advanced Airbag Modelling for Side Airbags and OOP using MADYMO”, *Advanced Airbag Simulation VDI 2003*, page 12/12 (2003)
- [16] Latin American & Carribean New Car Assessment Programme. Assessment protocol – Adult occupant protection (2016)
- [17] Latin American & Carribean New Car Assessment Programme. Resultado Ford Ka / Figo + 2 Airbags Outubro (2017)
- [18] Lin, C.H., Cheng, Y.P., Evaluation of LS-DYNA Corpuscular Particle Method for Side Impact Airbag Deployment Applications. 13th International LS-DYNA User Conference Session: Fluid Structure Interaction. Detroit - Michigan. 2014
- [19] Melo, S.C., Assis, M.A., Vimieiro, C.B.S., “Análise dos parâmetros biomecânicos em um ocupante de veículo em um impacto frontal”, *Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais*. Natal – RN (2012)
- [20] Sinz, W., Hermann, S., “The development of a 3D-Navier–Stokes code for the simulation of an airbag inflation”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16, 885–899 (2008)

- [21] Wang, X., Zong, Z., Zhao, Y., Zou, L., “A numerical study of passenger side airbag deployment based on arbitrary Lagrangian-eulerian method”, *Sci China Tech Sci*, 58, 397404 (2015)

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL ABLE TO FORECAST AN AIRBAG DRIVER CUSHIONING IN CASE OF A CRASH

Abstract – Dozens of new vehicles models are launched annually, each of them requires the development or at least the calibration of a new occupant restraint system (ORS), driver airbag is part of this system. At the same time, consumers have become increasingly aware about car safety performance and high safety parameter became a competitive factor for automakers. The development, optimization, and validation of ORS is a complex and expensive process. Thus, numerical simulation is essential in the initial and intermediate stages of airbag development to minimize time and cost associated with experimental testing. In general, virtual simulations applied in automotive industry requires considerable computational effort, simulation time and often skilled labor to deal with complex solvers. Thus, due to the increasing need to evaluate airbags behavior quickly and with low cost, this work aims to develop a model able to describe in a satisfactory way the interaction between an airbag driver and the occupant applying concepts from classical mechanics. The model was implemented in MATLAB language so that the results could be obtained quickly and efficiently through the iterative method. Some considerations have been made to simplify the phenomenon: the gas inside the airbag was considered an ideal gas, it was assumed that the airbag is symmetrical and all the deformations suffered by it are also spread symmetrically, the gas compression inside the cushion occurs adiabatically and the temperature profile inside of it is uniform. The developed model was correlated with Zhang et al model with less than 6% deviation, showing it was efficient to forecast the airbag behavior.

Keywords – Occupant Restraint System, Driver Airbag, Theoretical Airbag Model, Airbag Cushioning.