

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica

Marina Ulisses da Silva

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

Belo Horizonte
2019

Marina Ulisses da Silva

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Rudolf Huedner

(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte
2019

S586d

Silva, Marina Ulisses da.

Desenvolvimento de modelo matemático capaz de prever o amortecimento de impacto realizado por um *airbag* motorista [recurso eletrônico] / Marina Ulisses da Silva. - 2019.

1 recurso online (75 f. : il.,color.) : pdf.

Orientador: Rudolf Huebner.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 70-75.

Bibliografia: f. 67-69.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Amortecimento (Mecânica) - Teses. 3. Modelos matemáticos - Teses. I. Huebner, Rudolf.

II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.

III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

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

MARINA ULISSES DA SILVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**ENERGIA E SUSTENTABILIDADE**".

Dissertação aprovada no dia 27 de junho de 2019.

Por:

Prof. Rudolf Huebner

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Dr. Lúcio Barreto Pereira

Hunter Consultoria Ltda

Prof. Lucas Paglioni Pataro Faria

Centro Universitário Newton Paiva

À Marina Silva

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me abriu portas e me acompanhou durante toda minha trajetória acadêmica.

À minha família pela paciência, pelas infinitas orações, pela confiança e por me apoiarem sempre.

Aos amigos da FIAT , pela compreensão , por cubrirem minhas atividades e flexibilizarem meus horários. Sem vocês essa conquista não existiria.

À minha família de estrada, de Viçosa, de Campinas, de BH com quem eu divido meus dias, as angústias, as alegrias. Vocês são sensacionais e esse título é nosso.

Ao professor Rudolf , pelos ensinamentos e contribuições feitas nesse trabalho. Mas principalmente por ter acreditado em mim , no meu interesse pela pós graduação e ter me acompanhado em meio a vários altos e baixos.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com este trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Dezenas de novos modelos de veículos são lançados anualmente no Brasil, 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 faz parte o *airbag* motorista. Paralelamente, os consumidores têm se tornado cada vez mais conscientes com relação ao desempenho de segurança dos automóveis e padrões elevados de segurança se tornaram fator de competitividade para as montadoras. 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 um modo geral, as simulações virtuais utilizadas na indústria automotiva demandam considerável esforço computacional, tempo de simulação e muitas vezes mão de obra especializada para lidar com algoritmos complexos. 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 simplificado 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 e eficiente 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 toda a deformações sofrida 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 [17] com erro menor que 6% se mostrando eficiente para prever o comportamento do *airbag* quando a interação entre a bolsa e ocupante ocorre após o *airbag* está completamente inflado e posicionado.

Palavras chaves: sistema de retenção do ocupante, *airbag* motorista, modelo teórico de *airbag*, amortecimento por *airbag*.

ABSTRACT

Dozens of new vehicles models are launched annually in Brazil, 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 algorithms. Thus, due to the increasing need to evaluate airbags behavior quickly and with low cost, this work aims to develop a simplified 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 [17] model with less than 6% desvio , showing it was efficient to predict the airbag behavior when the interaction between cushion and occupant occurs after the airbag is fully inflated and positioned.

Key words: occupant restraint system, driver airbag, theoretical airbag model, airbag cushioning.

NOMENCLATURA

Letras latinas

A	área do furo de exaustão de ar em mm
g	aceleração da gravidade ao nível do mar
a	desaceleração da placa plana do impactador linear
M	massa molecular do gás no interior do airbag
R	constante universal dos gases ideais
T	temperatura
p	pressão
p_{atm}	pressão atmosférica local
z	deslocamento [m]
\dot{z}	velocidade [m/s]
\ddot{z}	aceleração [m/s ²]
C_p	capacidade calorífica à pressão constante
C_v	capacidade calorífica à volume constante

Letras gregas

ρ	densidade
μ	coeficiente de poisson do tecido
γ	coeficiente de expansão adiabática do gás.
ε	deformação linear

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Escala de cores utilizada pela Latin NCAP para identificar visualmente o desempenho biomecânico atingido pelas diferentes partes do corpo.	22
FIGURA 2.2 - Esquema do processo de acionamento de um <i>airbag</i>	27
FIGURA 2.3 Interação o ocupante com a bolsa do <i>airbag</i> em duas condições possíveis, com o <i>airbag</i> totalmente cheio e com o <i>airbag</i> em processo de enchimento.	30
FIGURA 2.4 Ilustração do setup de teste utilizado no experimento de Lin et all. Na figura está indicado a distância de 100mm entre o impactador linear e o <i>airbag</i> , mas essa distância foi variada durante o experimento assim como a velocidade de avanço da placa.	32
FIGURA 2.5 Resultados da correlação do teste de linear impactor no experimento de Lin et all. Lin chamou de Hybrid a simulação utilizando o método CV e de Particle a simulação aplicando o método CPM	33
FIGURA 2.6 Impactador linear em queda livre atingindo uma bolsa de <i>airbag</i> motorista completamente inflada. Teste utilizado para o desenvolvimento do modelo simplificado de Junyuan et all.	36
FIGURA 2.7 Modelo geométrico do <i>airbag</i> motorista de Junyuan et all.	37
FIGURA 2.8 Pouso de cargas lançadas a partir de aviões suavizado com o auxílio de bolsas de <i>airbag</i>	38
FIGURA 2.9 Sistema de amortecimento com quatro <i>airbags</i> utilizado para suavizar aterrissagem de cargas.	39
FIGURA 2.10 seção transversal do <i>airbag</i> ao longo do tempo à medida em que ele impacta o solo	39
FIGURA 3.1 Ilustração da aproximação da interação entre o motorista e o <i>airbag</i> por uma placa plana e por um esféide oblato.	42
FIGURA 3.2 Ilustração do instante inicial considerado para o desenvolvimento dos cálculos (<i>airbag</i> completamente cheio e posicionado e início da colisão com a placa).....	43
FIGURA 3.3 compressão do <i>airbag</i> ao passo que a placa avança em direção à bolsa.	44

FIGURA 3.4 Ilustração da seção transversal da bolsa do airbga à media em que a placa avança. A seção transversal representa tanto o corte no plano yx, quanto no plano yz uma vez que a deformação do airbga é uniforme.	45
FIGURA 3.5 Área da superficei cuja revolução completa entorno do eixo x possibilita calcular o volume do airbag em qualquer instante.	46
FIGURA 3.6 Esquema das dimensões da seção trasnversal da bolsa.	49
FIGURA 3.7A placa plana exerce uma força contra contra a superfície do airbga em contato com ela à medida em que avança.	51
FIGURA 3.8 Esquema do fluxo de dados para a resolução do sistema de valor inicial da EQ.(3.31)	53
FIGURA 3.9 Implementação em linguagem MATLAB do sistema de equações EQ.(3.31)	55
FIGURA 7.1 Esquema do fluxo de gás através para froa do airbag através do furo de exaustão circular de diâmetro d e área A	71
FIGURA 7.2 Ilustração da tensão circunferencial em uma seção transversal do airbag.....	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 Principais critérios de proteção ao ocupante avaliados conforme ABNT 15300-1.	19
TABELA 2.2 Limites utilizados para cálculo da pontuação do critério de desempenho da cabeça conforme Latin NCAP.....	23
TABELA 2.3 Limites utilizados para cálculo da pontuação do critério de desempenho do tórax conforme Latin NCAP.....	24
TABELA 3.1 Lista de constantes do sistema de equações EQ.(3.31).....	54
TABELA 3.2 Lista de valores iniciais para resolver de forma iterativa o sistema EQ.(3.31)	54
TABELA 3.3 - Matriz das simulações avaliadas	56
TABELA 4.1 Comparação dos picos de desaceleração entre os modelos de Zhang e marina para um furo de exaustão de gás de 0.35mm e massa inicial de gás de 0.040kg	58
TABELA 4.2 Influência do furo de vazão sobre a desaceleração máxima sofrida pela bolsa.....	62
TABELA 4.3 Influência do furo de vazão a distância final mínima entre volante e ocupante após o processo de amortecimento pelo airbag.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 Comparação do modelo desenvolvido com o trabalho de Zhang	58
GRÁFICO 4.2 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.035kg.....	60
GRÁFICO 4.3 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.040kg.....	60
GRÁFICO 4.4 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.045kg.....	61
GRÁFICO 4.5 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.050kg.....	61

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALE	Arbitrary Lagrangian and euler method.
CFD	Computational Fluid Dynamics
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CPM	Corpuscular particle method
CV	Volume de controle
FFC	Critério de força do fêmur
FPM	Finite pointset method,
HIC	Critério de lesão da cabeça
MADYMO	MAThematical DYnamic MOdels
NCAP	New Cars Assessment Programme
Nij	Critério de lesão do pescoço
OMS	Organização Mundial de Saúde
ORS	Occupant restrains system
V*C	Critério de viscosidade do tórax
TCFC	Critério de força de compressão da tíbia
ThCC	Critério de compressão do tórax
TNO	Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada
WP 29	World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Legislação brasileira	18
2.1.1 Contran	18
2.1.1.1 ABNT 15300-1	19
2.1.1.2 ABNT 15300-2.....	20
2.1.1.3 ABNT 15300-3.....	20
2.1.2 Latin NCAP	21
2.1.2.1 Método de avaliação Latin NCAP.....	21
2.1.2.2 Avaliação de proteção ao ocupante adulto em colisão frontal	22
2.1.2.2.1 Avaliação de desempenho da cabeça.....	23
2.1.2.2.2 Avaliação de desempenho do tórax.....	24
2.2 <i>Airbags</i> frontais	25
2.2.1 <i>Airbag</i> Motorista	28
2.3 Desenvolvimento dos sistemas de <i>airbags</i>	28
2.3.1 Métodos mais comuns utilizados para simulação de <i>airbags</i>	29
2.4 Programas comerciais.....	34
2.4.1 MADYMO	34
2.4.2 LS-Dyna	34
2.4.3 Pam-Crash	35
2.5 Modelos otimizados simplificados	35
2.5.1 Modelo de Zhang et al.....	36
2.5.2 Modelo de Wen at al.....	38

3 METODOLOGIA	42
3.1 Considerações gerais para o desenvolvimento do modelo	43
3.1.1 Definição do sistema	44
3.1.2 Modelo do esferóide	44
3.1.3 Equação do gás ideal	48
3.1.4 Equação do perímetro da seção transversal	48
3.1.5 Equação da vazão de gás para fora da bolsa.....	49
3.1.6 Equação do avanço da placa em direção á bolsa	51
3.1.7 Equações da velocidade e da aceleração	52
3.1.8 Sistema de equações	52
3.2 Desenvolvimento do modelo em MATLAB de exaurimento de gás do airbag.	54
3.3 Avaliação dos parâmetros que influênciam a desaceleração e o deslocamento da placa	
56	
4 RESULTADOS	57
4.1 Validação do modelo	57
4.2 Influência da variação do diâmetro furo de exaustão sobre a desaceleração da placa	58
4.3 Influência da variação do furo de exaustão sobre o deslocamento da placa	62
4.4 Condição de contato placa – <i>airbag</i> quando a bolsa não está completamente inflada...	63
5 CONCLUSÕES	65
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
7 APÊNDICE A	69
7.1 Cálculo do critério de lesão da cabeça.....	69
7.2 Cálculo do critério de viscosidade do tórax.....	69
7.3 Dedução do modelo de Zhang at all.	70
7.4 Dedução do modelo de Wen at all.....	72

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Plano Global para a Segurança nas Estradas divulgado pela Organização Mundial de Saúde, OMS, o número de mortes causadas direta ou indiretamente por acidentes de trânsito é cerca de 1.3 milhões de pessoas por ano, o que corresponde a 3000 mortes a cada dia [20]. 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 [21]. Adicionalmente, mais de 20 milhões de pessoas carregam sequelas de colisões não fatais. As consequências econômicas dessas colisões estão estimadas entre 1% e 3% do produto interno bruto dos países [20].

Diante da gravidade dos impactos causados pelos acidentes de trânsito no mundo, em março de 2010; na assembleia geral das Nações Unidas, por meio da resolução 64/255 a década de 2011 a 2020 foi proclamada “ A Década da Ação para a Segurança no Trânsito” e ; em conjunto com a Organização Mundial de Saúde, as Nações Unidas estabeleceram um plano de ação contendo uma série de objetivos a níveis nacional, regional e global a fim de reduzir e estabilizar a taxa de mortalidade em consequência de acidentes rodoviários [20].

Dentre os pilares para alcançar os objetivos da década de ações para a segurança nas estradas está a produção e comercialização de carros mais seguros. Deste modo, tem-se as implementações de tecnologias que melhoram a segurança passiva e ativa dos veículos, e a implementação de legislações de segurança viária de parâmetros internacionais baseados no WP 29 (fórum mundial para harmonização da legislação veicular) e a informação aos consumidores acerca da segurança dos veículos disponíveis no mercado.

No âmbito da produção e comercialização de veículos mais seguros o desenvolvimento dos *airbags* ganhou forças no território brasileiro, principalmente pelo estabelecimento da obrigatoriedade desse dispositivo de segurança por meio da resolução número 311 do CONTRAN, em que os *airbags* frontais motorista e passageiro tornaram-se obrigatórios a partir de 01/01/2013 para todos os veículos comercializados em território brasileiro. E, o desenvolvimento, otimização e validação dos sistemas de *airbags* surgiram como um grande desafio para as indústrias automotivas nacionais.

O desenvolvimento de um sistema de airbag 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.

Alguns programas comerciais desenvolvidos para simular colisões e prever o comportamento dos sistemas de airbag estão disponíveis no mercado e são amplamente utilizados pela indústria. As principais desvantagens desses programas estão nos custos elevados de suas licenças e nos segredos industriais associados ao seu funcionamento. O operador precisa lidar com o programas complexos de manipular e ainda assim não tem clareza de quais são os critérios, equações e condições de contorno empregadas nas simulações.

1.1 Objetivos

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 a partir do instante em que a mesma já se encontra completamente inflada e posicionada. Para desenvolvimento do modelo foram utilizados conceitos de mecânica clássica e a fim de garantir a implementação de soluções de maneira rápida as equações obtidas foram implementadas em linguagem Matlab para serem resolvidas pelo método iterativo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Legistação brasileira

2.1.1 Contran

Em 03 de abril de 2009 o Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN – por meio da resolução número 311 estabeleceu o uso obrigatório dos *airbags* frontais motorista e passageiro para os veículos novos; saídos de fábrica e para os veículos originários de novos projetos, das categorias M1 e N1, nacionais e importados. [6] Por entender que a instalação desse dispositivo de segurança passiva reduz de maneira expressiva os danos causados ao condutor e ao passageiro dianteiro em caso de colisões frontais.

Conforme calendário de implementação dos *airbags* estabelecido pela resolução 311 do CONTRAN, os *airbags* frontais tornaram-se obrigatórios em todos os veículos comercializados em território brasileiro, nacionais ou importados, em 01/01/2013 para os projetos novos e em 01/01/2014 para veículos saídos de fábrica derivados de projetos já em produção.

Independente do calendário de implementação dos *airbags* estabelecido pela resolução 311 do CONTRAN; a resolução 201 do CONTRAN datada de 11 de janeiro de 2007 estabelece os critérios de proteção aos ocupantes dos veículos comercializados em território brasileiro a partir de 2012 para os projetos novos e a partir de 2014 para veículos saídos de fábrica derivados de projetos já em produção. No artigo primeiro fica estabelecido que para a proteção ao ocupante, em caso de colisões frontais, os critérios de avaliação biomecânica devem respeitar a norma ABNT 15300-1 em conjunto com uma das normas a seguir: ABNT 15300-2 ou ABNT 15300-3, a critério do fabricante [5]. A ABNT 15300-1 estabelece os requisitos de desempenho que devem ser atingidos em caso de colisão frontal, enquanto que as ABNTs 15300-2 e 15300-3 estabelecem diferentes procedimentos de ensaio de colisão que podem ser utilizados a fim de se atingir os requisitos estabelecidos na ABNT 15300-1.

2.1.1.1 ABNT 15300-1

A parte 1 da ABNT 15300 denominada: Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante - ensaios de impacto frontal : Requisitos de desempenho; estabelece os requisitos de proteção que devem ser atingidos pelos automóveis, caminhonetas e veículos deles derivados em caso de colisão frontal. Os principais critérios de proteção avaliados estão listados na TAB. 1.1:

TABELA 2.1 Principais critérios de proteção ao ocupante avaliados conforme ABNT 15300-1.

Índice	Denominação	Descrição
HIC	Critério de lesão da cabeça	Estabelece uma relação entre as acelerações medidas na cabeça e os intervalos de tempo em que elas ocorrem. É calculado através de uma fórmula empírica.
ThCC	Critério de compressão do tórax	Valor absoluto da deformação do tórax em milímetros.
V*C	Critério de viscosidade do tórax	Relaciona a velocidade de compressão do esterno com a compressão em si a cada instante. É calculado através de fórmula empírica.
Nij	Critério de lesão do pescoço	Estabelece uma relação entre as forças de compressão, tração e cisalhamento no pescoço e o intervalo de tempo em que elas ocorrem. É calculado através de fórmula empírica.
FFC	Critério de força do fêmur	Estabelece uma relação entre a carga de compressão transmitida através de cada fêmur e o intervalo de tempo em que elas ocorrem.
TCFC	Critério de força de compressão da tíbia	Estabelece uma relação entre a carga de compressão transmitida axialmente através de cada tíbia. É calculado através de fórmula empírica.

Os critérios que devem atingidos para considerar um veículo homologado variam de acordo com a metodologia de teste aplicada (conforme ABNT 15300- 2 ou ABNT 15300-3); entretanto, os critérios avaliados são sempre os mesmos.

Os *airbags* frontais motorista e passageiro contribuem principalmente com a adequação aos critérios de lesão da cabeça e de compressão do tórax. Os demais critérios são influenciados principalmente pelo cinto de segurança e pelas características estruturais da carroceria.

2.1.1.2 ABNT 15300-2

A parte 2 da ABNT 15300 denominada: Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante- ensaios de impacto frontal : Procedimentos de ensaio de impacto frontal com 100% de sobreposição; estabelece o procedimento de ensaio de colisão frontal com 100% de sobreposição. Neste ensaio, é necessário colidir o veículo contra uma barreira fixa e rígida perpendicularmente à sua linha da trajetória. A velocidade no momento da colisão não pode ser inferior a 48 km/h e todo o comprimento do veículo deve colidir contra a face da barreira. O manequim avaliado é o Hybrid III cujo perfil corporal representa 50% da população masculina do Estados Unidos,

2.1.1.3 ABNT 15300-3

A parte 3 da ABNT 15300 denominada: Procedimentos de ensaio de impacto frontal com 40% de sobreposição; estabelece o procedimento de ensaio de colisão frontal com 40% de sobreposição. Neste ensaio, é necessário colidir o veículo contra uma barreira deformável ancorada no solo, perpendicularmente à sua linha da trajetória. A velocidade no momento da colisão não pode ser inferior a 56 km/h e a instalação da barreira deve ser de tal forma que o veículo entre em contato com a face da barreira pelo lado da coluna de direção em um ponto a 40% de sua largura total. O manequim avaliado é o Hybrid III cujo perfil corporal representa 50% da população masculina do Estados Unidos,

2.1.2 Latin NCAP

A Latin NCAP é uma associação jurídica que avalia carros novos comercializados na América Latina e no Caribe a fim de fornecer aos consumidores informações imparciais e transparentes acerca do nível de segurança dos veículos. A Latin NCAP tem sua origem na Global NCAP, do inglês “*Global New Car Assessment Programme*” órgão internacional que tem como objetivo avaliar as características de segurança dos veículos automotores individualmente e comparativamente a outros veículos de classe semelhante além de divulgar essas informações ao público; estimulando os fabricantes a melhorarem a segurança de seus veículos e incentivando os governos a adotarem regulamentações de padrões internacionais para os testes de colisão em veículos de passageiros.

Atualmente há cinco NCAPs ao redor do mundo, todas elas classificam o nível de segurança dos veículos por meio de estrelas sendo cinco estrelas NCAP a pontuação máxima que pode ser atingida por um veículo. Entretanto, um carro cinco estrelas em uma determinada região pode não ser cinco estrelas em outra, uma vez que os critérios de avaliação das diversas NCAPs é ponderado pela legislação regional e o padrão de segurança veicular das Nações Unidas ainda não é requerido em todos os países do mundo.

A LATIN NCAP tem por objetivo avaliar de forma justa e significativa a performance dos carros novos comercializados na América Latina e no Caribe manter os consumidores informados dos resultados alcançados a fim de promover a demanda por carros mais seguros.

2.1.2.1 Método de avaliação Latin NCAP

A avaliação da proteção ao ocupante adulto é baseada em dados coletados sob áreas relevantes do corpo de um manequim; cujo perfil corporal representa 50% da população masculina do Estados Unidos, em resposta à colisão frontal do veículo contra uma barreira deformável. A velocidade no momento da colisão não pode ser inferior a 64 km/h e a instalação da barreira deve ser de tal forma que o veículo entre em contato com a face deformável em um ponto a 40% de sua largura total. São avaliados o motorista e o passageiro do assento dianteiro. A pontuação obtida a partir das respostas coletadas sob o corpo dos manequins é sujeita a ajustes devido à requerimentos suplementares do teste; por exemplo, a performance estrutural do veículo, em que o deslocamento

do volante, o movimento dos pedais e a intrusão das partes da carroceria durante a colisão são alguns dos modificadores da pontuação inicial [9].

A pontuação final obtida para as diferentes regiões do corpo é visualmente apresentada através de uma escala de cores conforme FIG. 1.1.

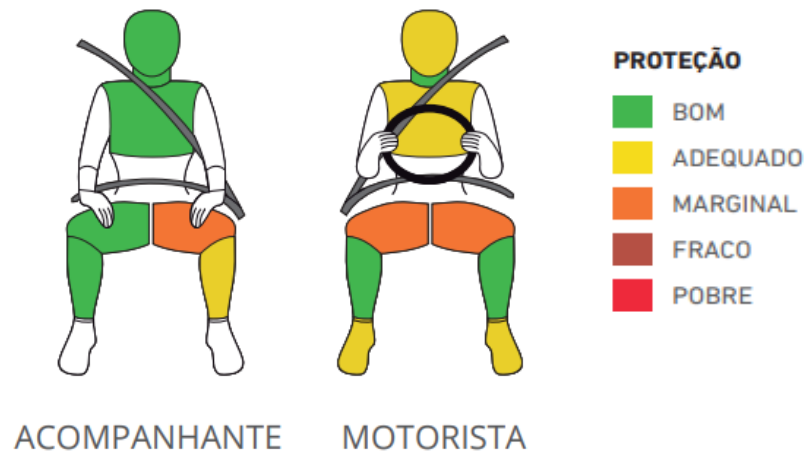


FIGURA 2.1 Escala de cores utilizada pela Latin NCAP para identificar visualmente o desempenho biomecânico atingido pelas diferentes partes do corpo.

FONTE : LATIN NCAP Ford Ka/ Figo, 2017, p.2

Para cada critério biomecânico a máxima pontuação que pode ser obtida é de 4 pontos. São determinados um valor máximo e um valor mínimo para medir o desempenho de cada um desses critérios. Critérios avaliados acima do limite máximo somam 4 ponto, critérios avaliados abaixo do limite mínimo não somam pontos e para critérios avaliados entre os limites máximo e mínimo a pontuação a ser somada é determinada por interpolação linear.

2.1.2.2 Avaliação de proteção ao ocupante adulto em colisão frontal

Mais de um critério biomecânico pode ser aplicado para avaliar a mesma região do corpo. A pontuação final obtida pelo veículo é referente ao manequim que obteve o menor desempenho, podendo ser a pontuação alcançada pelo motorista ou pelo passageiro. No impacto frontal; as regiões da cabeça, pescoço e abdômen são consideradas as regiões críticas. Caso na avaliação de alguma dessas regiões o limite mínimo de desempenho não seja alcançado a pontuação

total do teste é zerada pois o veículo oferece alto risco de ferimento em caso de colisão sendo considerado inaceitável.

Os *airbags* frontais motorista e passageiro contribuem principalmente com a adequação aos critérios de lesão da cabeça e de compressão do tórax.

2.1.2.2.1 Avaliação de desempenho da cabeça

A biomecânica da cabeça é um objetivo de avaliação importante uma vez que nos impactos frontais o movimento relativo entre o cérebro e o crânio induz picos de pressão positiva e negativa nesse órgão [14]. Estudos realizados pela Universidade de Wayne demonstraram que a capacidade do cérebro de tolerar desacelerações depende tanto do módulo da desaceleração quanto do intervalo de tempo em que ela atua; sendo que, em pequenos intervalos de tempo o cérebro é capaz de tolerar picos maiores [1].

O desempenho da cabeça é medido através do HIC , “*head injury criteria*”, que pode ser traduzido para o português como critério de traumatismo craniano. O HIC é um adimensional que estima a probabilidade de lesões na cabeça como consequência de um impacto. Para o seu cálculo é levado em consideração o pico de desaceleração sofrido pela cabeça medido em *g* e a duração dessa desaceleração.

Para efeitos de cálculo do HIC₁₅ o intervalo de tempo máximo considerado é de 15ms.

Quando a desaceleração da cabeça é menor que 80g assume-se que não houve contato rígido entre ela e as partes interna do veículo e a pontuação máxima de 4 pontos pode ser aplicada para esse critério biomecânico. Caso haja contato rígido os limites da TAB. 1.2 são aplicados para o cálculo da pontuação.

TABELA 2.2 Limites utilizados para cálculo da pontuação do critério de desempenho da cabeça conforme Latin NCAP

Valores de HIC e Max. aceleração utilizados como extremos para interpolação linear	Classificação quanto à performance
HIC ₁₅ = 500 Máxima aceleração resultante por mais de 3ms 72 <i>g</i>	Limite superior ou limite de alta performance
HIC ₁₅ = 700 Máxima aceleração resultante por mais de 3ms 88 <i>g</i>	Limite inferior ou limite de baixa performance

2.1.2.2.2 Avaliação de desempenho do tórax

A biomecânica do tórax é um objetivo de avaliação importante pois nessa região se encontram diferentes tecidos, órgãos e ossos essenciais. A quebra da caixa torácica levando ao esmagamento dos órgãos internos é motivo comum de fatalidade em colisões frontais [14]. A avaliação de desempenho do tórax é medida em termos da compressão máxima do tórax em relação à coluna vertebral e em termos do critério de viscosidade do tórax. O primeiro parâmetro é o valor absoluto expresso em milímetros da compressão da caixa torácica entre o esterno e a coluna vertebral [1]. O segundo parâmetro é calculado através de fórmula empírica que relaciona a velocidade de compressão do esterno com a compressão em si a cada instante [1].

Quando a compressão da caixa torácica entre o esterno e a coluna vertebral expressa em milímetros é menor que 22 mm a pontuação máxima de 4 pontos pode ser aplicada para esse critério biomecânico. Para valores de compressão maiores que esse a TAB. 1.3 é aplicada a para o cálculo da pontuação.

TABELA 2.3 Limites utilizados para cálculo da pontuação do critério de desempenho do tórax conforme Latin NCAP

Valores de compressão do peito e critério de viscosidade utilizados como extremos para interpolação linear	Classificação quanto à performance
Compressão = 22mm Critério de viscosidade = 0.5m/s	Limite superior ou limite de alta performance
Compressão = 42 mm Critério de viscosidade = 1 m/s	Limite inferior ou limite de baixa performance

2.2 Airbags frontais

O sistema de *airbags* frontais de um veículo é composto pelo *airbag* do motorista (DAB), do passageiro (PAB) e pelos *airbags* de joelho (KAB). Sendo o DAB e o PAB obrigatórios em todo os veículos de passeio produzidos e comercializados em território brasileiro a partir de primeiro de janeiro de 2013 conforme CONTRAN nº 311 de 03/04/2009.

A CONTRAN nº 311 de 03/04/2009 define *airbags* como:

Equipamento suplementar de retenção que objetiva amenizar o contato de uma ou mais partes do corpo do ocupante com o interior do veículo composto por um conjunto de sensores colocados em lugares estratégicos da estrutura do veículo, central eletrônica, dispositivo gerador de gás propulsor para inflar a bolsa de tecido resistente.

Os *airbags* são dispositivos de segurança 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 habitáculo 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.

Os *airbags* são acionados quando é identificada uma desaceleração brusca em um curto intervalo de tempo, por sensores posicionados estrategicamente nos veículos. Nem todo tipo de colisão provoca o acionamento dos *airbags*, em colisões a velocidades muito baixas pode não haver ganho em proteção ao ocupante e; nesses casos, o *airbags* não são ativados. Da mesma forma, em colisão lateral os *airbags* frontais não são acionados e vice-versa. Cada veículo possui suas peculiaridades estruturais e um sistema de segurança cuidadosamente desenhado e calibrado para assegurar proteção aos ocupantes em caso de colisão. Deste modo, o tempo de acionamento da bolsa e os intervalos de velocidade de colisão em que o *airbag* deve ser ativado variam caso a caso. Segundo Bendjaballah et al [6] para a grande maioria dos veículos de passeio os *airbags* devem ser acionados em situações equivalentes a um veículo colidindo contra uma parede rígida com velocidade entre 12 e 23km/h.

O tempo decorrido desde o instante em que a central elétrica identifica uma colisão com necessidade de acionamento do *airbag* e o início da ignição do gerador é denominado *time to fire*. O tempo necessário para que o *airbag* esteja totalmente inflado e em posição a partir do instante em que o gerador é acionado é denominado *filling time*. Tanto o *time to fire* quanto o *filling time* variam de acordo com as características elétricas e estruturais do veículo, com a taxa produção de gás pelo gerador e com as características da bolsa do *airbag*. De modo geral, os

airbags são calibrados para que, em caso de colisão, a bolsa esteja completamente cheia e em posição quando entrar em contato com o ocupante o que ocorre em média 45ms após a colisão.

Os *airbags* 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 em que o *airbag* se esvazia. Características do tecido da bolsa, como por exemplo, a permeabilidade também cumprem um papel importante na dinâmica de exaurimento do gás.

No momento imediatamente anterior à colisão a energia cinética do ocupante é função da velocidade do veículo naquele instante. Após a colisão, o ocupante é desacelerado até o repouso e sua energia cinética final passa a ser igual a zero. Para um motorista de massa m que estava viajando num veículo à velocidade v_1 no instante imediatamente anterior à colisão a variação da quantidade de movimento entre o instante em que ele começa a ser desacelerado até o instante em que atinge o repouso é dado pela EQ. (1.6)

$$\Delta Q = m(v_1 - v_2) \quad (1.5)$$

Uma vez que o estado final se refere ao repouso $v_2 = 0$.

$$\Delta Q = mv_1 \quad (1.6)$$

O teorema do impulso diz que “o impulso da resultante das forças que atuam sobre um corpo, num determinado intervalo de tempo, é igual à variação da quantidade de movimento do corpo no mesmo intervalo de tempo”. Matematicamente o teorema do impulso é expresso pela EQ.(1.7).

$$I = \Delta Q = mv_1 \quad (1.7)$$

Adicionalmente, da segunda lei de Newton tem-se que a variação da quantidade de movimento num corpo é o produto entre a força atuando sobre ele e o intervalo de tempo em que ela atua. Matematicamente a segunda lei de Newton é expressa pela EQ.(1.8).

$$\Delta Q = I = F \Delta t \quad (1.8)$$

Ao comparar EQ. (1.7) e EQ. (1.8) obtém-se a relação indicada na EQ. (1.9). Ao aumentar o tempo total decorrido entre o instante da colisão e o momento em que o ocupante atinge o repouso o *airbag* reduz a força resultante sobre ele. Adicionalmente, ao se interpor entre as partes rígidas do veículo e o corpo do ocupante o *airbag*, por ser bastante volumoso, também aumenta a área de contato sobre a qual é distribuída a força da colisão diminuindo a compressão localizada de partes críticas do corpo como, por exemplo, a cabeça e o tórax.

$$m \times v_1 = F \times \Delta t \quad (1.9)$$

A FIG.1.2 Apresenta esquematicamente o mecanismo de funcionamento de um *airbag*:

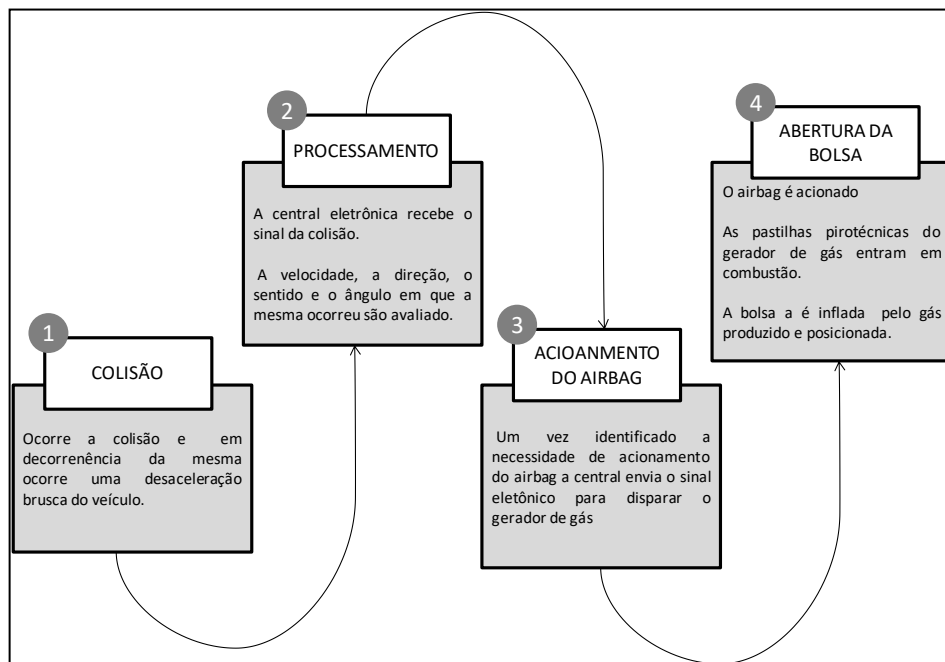


FIGURA 2.2 - Esquema do processo de acionamento de um *airbag* .

2.2.1 Airbag Motorista

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.

De modo geral, a grande maioria dos *airbags* motorista consiste em uma bolsa de tecido construída a partir da junção entre dois painéis circulares. O material do tecido da bolsa varia entre os diferentes *airbags* disponíveis no mercado; sendo sua escolha baseada no equilíbrio entre custo e desempenho. A bolsa é dobrada randomicamente e alojada em um container dentro do volante juntamente com o gerador de gás. O gerador é fixado através de costura e/ou solda, e/ou parafusamento no centro de um dos painéis circulares que compõem a bolsa. Assim, quando o *airbag* é acionado, o gerador produz gás, alimenta a bolsa que, ao estar completamente inflada, passa a apresentar a característica geométrica de um esferoide oblato.

2.3 Desenvolvimento dos sistemas de *airbags*

No desenvolvimento de um automóvel, o sistema composto por *airbags* e cintos de segurança é comumente denominado *occupant restrains system* (ORS) e faz parte do sistema de segurança passiva o qual; por sua vez, engloba todos os componentes veiculares responsáveis por minimizar danos e proteger os ocupantes caso um acidente ocorra. Capacete, encosto de cabeça dos assentos e barras de proteção da carroceria também englobam o sistema de segurança passiva do veículo.

Dezenas de novos modelos de carros são lançados anualmente no Brasil, e para cada veículo novo, na grande maioria das vezes, faz-se necessário o desenvolvimento de um novo ORS. A legislação está cada vez mais rigorosa e vêm exigindo a otimização dos sistemas de retenção dos veículos em produção a fim de alcançar padrões de segurança internacional. Adicionalmente, o consumidor está cada vez mais atendo ao desempenho de segurança dos veículos e, de consequência, padrões elevados de segurança veicular estão se tornando um fator de competitividade para as montadoras.

O desenvolvimento, otimização e validação do ORS é um processo complexo e dispendioso uma vez que é necessário compreender como o sistema interage com o ocupante em

situações colisão. A colisão por sua vez, pode ocorrer em diferentes cenários o que aumenta ainda mais a complexidade das avaliações. Por exemplo, quando se deseja desenvolver um sistema de retenção com padrões internacionais de excelência são avaliadas situações que extrapolam o mínimo necessário para cumprir com os requisitos da Contran 311, são avaliadas situações em que o motorista conduz o veículo utilizando o cinto de segurança e também situações nas quais o dispositivo não é utilizado. São avaliados cenários com ocupantes mais vulneráveis com por exemplo situação em que são transpostados nos assentos dianteiros crianças ou adultos de perfil corporal bem menor que a média, dentre outros cenários.

Diante da infinidade de cenários que precisam ser analisados e da dinâmica de constante novos desenvolvimentos a simulação numérica é essencial nas etapas iniciais e intermediárias do desenvolvimento do sistema de retenção para minimizar o tempo e o alto custo associado aos testes experimentais.

2.3.1 Métodos mais comuns utilizados para simulação de *airbags*

A simulação numérica de *airbags* é um atividade complexa pois envolve a descrição de fenômenos de mecânica sólida e fluida que ocorrem simultaneamente. As leis da mecânica sólida regem o comportamento do tecido da bolsa que está, a princípio, dobrada e acomodada dentro de uma fronteira e que é desdobrada por efeitos da expansão do gás em seu interior à medida em que infla. Sendo; em seguida, submetida à tensão por efeitos desse mesmo gás e devido à ação da força de compressão do ocupante sobre o *airbag* já inflado. O comportamento do gás, por sua vez, é regido pelas leis da mecânica fluida. De acordo com Sinz et al [15] o grande desafio da simulação é descrever de maneira apropriada o escoamento do gás.

Segundo Marcklund et al [13], 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 atualmente.

Conforme esclarecido por Sinz et al [15], o método CV aproxima o *airbag* de um volume em expansão à medida em que a bolsa infla e de um volume em compressão com fluxo de massa através das fronteiras do volume ao passo em que a bolsa encontra uma barreira. O gás é

tratado como um gás ideal, e dentro da bolsa propriedades como densidade, temperatura e pressão são considerados uniformes ao longo de toda a extensão do volume de controle a cada instante.

O método CV tem se mostrado preciso para descrever situação em que a interação do ocupante com a bolsa se dá quando o *airbag* já está completamente cheio [8]. Entretanto, conforme mostrado na figura FIG.2.1 este não é o único cenário que precisa ser avaliado. Situações em que o ocupante interage com a bolsa enquanto o *airbag* ainda está inflando tornam a pressão interna do *airbag* fortemente não uniforme e o modelo CV passa a ser inapropriado para descrever o fenômeno com precisão [8].

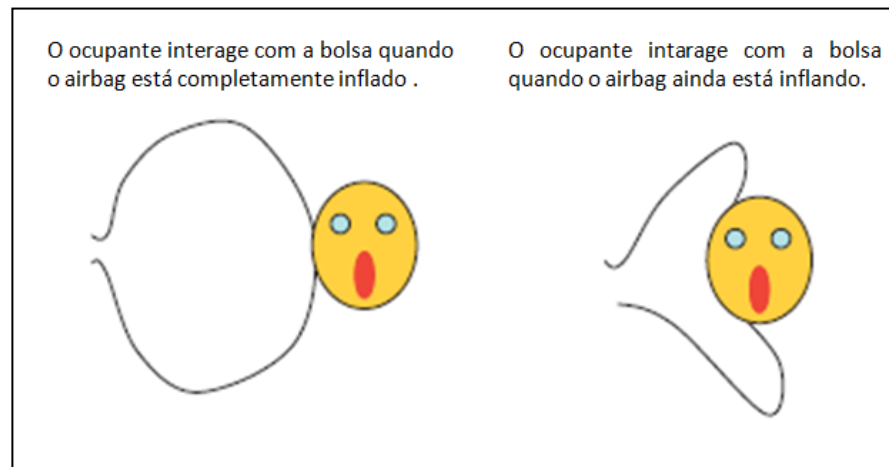


FIGURA 2.3 Interação o ocupante com a bolsa do *airbag* em duas condições possíveis, com o *airbag* totalmente cheio e com o *airbag* em processo de enchimento.

Situações como indicado no lado direito da FIG.2.1 são bastante comuns em impactos laterais quando o *airbag* se interpõe entre o assento e os revestimentos internos do veículo. Neste caso, a bolsa e o ocupante estão muito próximos e a interação entre eles é muito rápida [11]. Este cenário também ocorre com frequência quando o ocupante está dirigindo sem cinto de segurança , ou quando uma criança é transportada no banco dianteiro [11].

Sinz et al [15] citam que recentemente foi desenvolvido o método FPM ,do inglês, *finite pointset method*, mais apropriado para descrever situações em qua a geometria da área de escoamento varia muito significativamente a cada instante e em que a pressão interna não é uniforme ao longo do volume da bolsa. O método FPM é baseado na abordagem lagrangiana, ele considera que particulas se movem livremente com a velocidade local do escoamento e carregam consigo as grandezas que descrevem o escoamento do fluido (densidade, temperatura , etc). O

modelo FPM ainda é pouco estudado mas sabe-se que é necessário um considerável esforço computacional para obtenção de resultados satisfatórios.

Wang et al [18] citam o modelo CPM, do inglês *corpuscular particle method*, também baseado na abordagem lagrangiana e que tem seus princípios básicos fundamentados na teoria cinético molecular. No modelo CPM um conjunto de moléculas gasosas é representado por uma partícula sólida e esférica. O gás no interior do airbag é tratado como um conjunto dessas partículas em movimento randômico e que obedecem as leis de Newton do movimento [18] A expansão da bolsa é uma consequência da colisão dessas partículas contra o tecido. O gás é tratado como um gás ideal uma vez que considera-se a distância média entre cada partícula individual muito maior que o tamanho das partículas. A quantidade de partículas utilizadas na descrição do modelo influencia fortemente na precisão dos resultados obtidos. Estudos sugerem que sejam utilizadas 10.000 partículas por litro de volume da bolsa para que sejam obtidos resultados confiáveis. Sabe-se que o aumento da quantidade de partículas aumenta o esforço computacional e consequentemente o tempo e o custo da simulação [11]. Para um *airbag* motorista cujo volume padrão de mercado está entre 45 e 60 litros , seriam necessárias pelo menos entre 450.000 e 600.000 partículas a fim de obter uma simulação com precisão adequada.

Se comparado com o modelo CV o modelo CPM exige maior esforço computacional, entretanto, apresenta ganho significativo em precisão conforme será mostrado a seguir .

Lin et al [11] utilizaram os métodos CV e CPM para simular a deflagração de um *airbag* lateral contra uma parede plana se movendo em sua direção e compararam os resultados das duas simulações com testes físicos. A massa da parede, a sua posição inicial com relação ao *airbag* e a velocidade de avanço foram variadas durante uma bateria de testes a fim de obter uma grande quantidade de resultados em situações diversas e consequentemente aumentar o grau de confiança das observações realizadas. A figura FIG.2.2 ilustra o set up do teste .

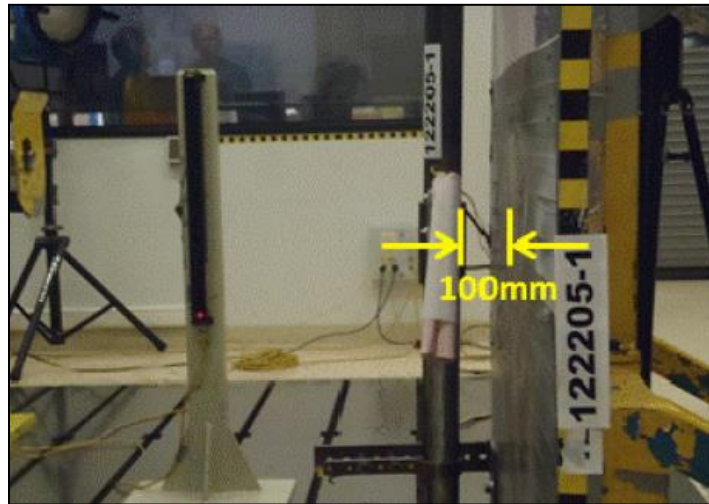


FIGURA 2.4 Ilustração do setup de teste utilizado no experimento de Lin et al. Na figura está indicado a distância de 100mm entre o impactador linear e o airbag, mas essa distância foi variada durante o experimento assim como a velocidade de avanço da placa.

FONTE: Lin et al, p13.

Conforme ilustrado na figura FIG.2.3, Lin et al [11] observaram que para pequenas distâncias iniciais entre a placa e o *airbag*, por pequena distância entende-se distâncias menores ou iguais a 60mm, a placa plana atinge o *airbag* quando a bolsa ainda está inflando e o método CPM é ligeiramente mais preciso que o método CV para descrever o perfil de pressão ao longo do tempo. Entretanto, para distâncias maiores ou iguais a 100mm, a placa atinge o *airbag* quando ele já está completamente inflado e o resultado obtido com os dois métodos de simulação é praticamente idêntico.

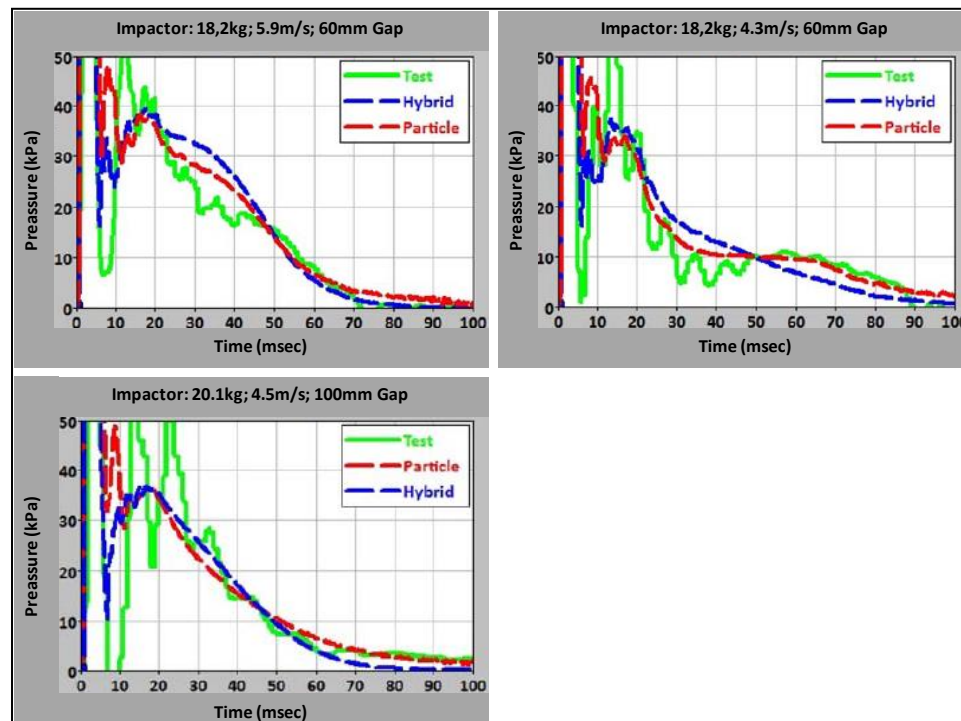


FIGURA 2.5 Resultados da correlação do teste de lianar impactor no experimento de Lin et all. Lin chamou de Hybrid a simulação utilizando o método CV e de Particle a simulação aplicando o método CPM .

FONTE: Lin et all, p8.

Outro método bastante preciso e eficiente para descrever o comportamento dos airbags é o método ALE, do inglês *Arbitrary Lagrangian and euler method*. Neste caso, o gás é modelado segundo o método de Euler; entretanto, diferentemente do que ocorre no método CV no método ALE o interior do airbag é dividido em uma malha em que cada elemento apresenta condições específicas de pressão, temperatura e velocidade de modo que a pressão não é considerada uniforme [8]. Já o tecido, é modelado conforme a abordagem de lagrange, são estabelecidas malhas deformáveis cuja deformação é baseada no movimento do airbag. Para que a simulação seja eficiente são necessários passos de tempo extremamente pequenos o que faz com que o método ALE exija muito mais esforço computacional comparado aos outros métodos [15].

2.4 Programas comerciais

Alguns programas comerciais estão disponíveis no mercado e são amplamente utilizados pela indústria automotiva nos primeiros estágios de desenvolvimento e otimização de projetos.

2.4.1 MADYMO

O Madymo é um programas para avaliação de sistemas de segurança na indústria automotiva e de transportes, desenvolvido pela TNO e distribuído pela TASS *International*. É o programas comercial mais utilizado na indústria automotiva para simulação, análise e otimização de projeto de sistema de segurança ao ocupante.

O pacote do Madymo combina em um único *solver* tecnologia multicorpos, elementos finitos e CFD. Corpos rígidos geralmente são modelados por sistemas multicorpos, elementos finitos são empregados para simular estruturas deformáveis tais como cinto de segurança e *airbags*, já a modelagem do fluxo de gás dentro da bolsa é feito através de modelos em CFD [16].

Outra 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 são capazes de representar de maneira satisfatória as respostas do corpo humano em diversas situação de colisão e também em cenários de não-colisão [16].

Devido à extensiva gama de cenários que podem ser analisados pelos modelos em Madymo a grande desvantagem do programas está no alto custo de licença, na necessidade de profissionais treinados e qualificados para manipular o programa, no tempo de simulação que é elevado devido á grande quantidade de informações disponibilizadas, além da necessidade de computadores de alto desempenho..

2.4.2 LS-Dyna

O LS-DYNA é um programa de simulação desenvolvido pela *Livermore Software Technology Corporation* (LSTC) que utiliza elemntos finitos para simular problemas do mundo

real. O LS-DYNA é amplamente utilizado nas indústrias automobilística, aeroespacial, de construção civil e militar.

O LS-DYNA 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. Principalmente por esses fatores este programa é muitas vezes o escolhido para simulação de colisões veiculares [12].

2.4.3 Pam-Crash

O Pam-Crash é um programa desenvolvido pelo ESI-Group inicialmente empregado nas indústrias aeroespaciais e nucleares e que ganhou espaço na indústria automotiva nos anos 80 quando um conglomerado de sete grandes indústrias automobilísticas; Audi, BMW, Ford, Mercedes-Benz, Opel, Porsche e Volkswagen; conhecido na época como FAT - Forschungsgemeinschaft Automobil-Technik, apoiou o ESI-Group a simular o comportamento de um veículo em caso de colisão. [7]

O Pam-Crash tem suas simulações baseadas em elementos finitos e permite modelar com precisão geometrias complexas de elementos estruturais. Atualmente é utilizado na indústria automotiva em projeto de sistemas de segurança dos ocupantes. [7]

Atualmente é possível simular uma colisão completa em Pam-Crash em 24h utilizando computadores de alto desempenho. [7]

2.5 Modelos otimizados simplificados

Os métodos de simulação expostos até então neste trabalho exigem, de um modo geral, considerável esforço computacional, tempo de simulação e muitas vezes mão de obra especializada para lidar com algoritmos complexos. Tendo em vista a crescente necessidade de avaliar o comportamento dos *airbags* de maneira rápida e a baixo custo pesquisadores vêm trabalhando recentemente 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, o teorema do momento linear e algumas considerações Zhang et al [17] desenvolveram 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 interativa em linguagem de MATLAB.

2.5.1 Modelo de Zhang et al

A figura FIG.2.5 ilustra um impactador linear em queda livre atingindo um *airbag* motorista no instante imediatamente posterior ao momento em que a bolsa se inflou por completo. Este experimento foi a base para o desenvolvimento do algoritmo simplificado de Zhang et al [17].

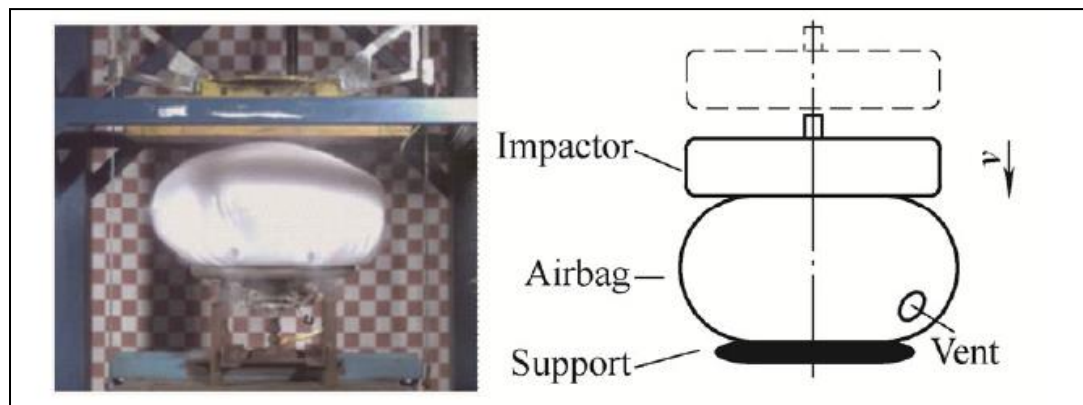


FIGURA 2.6 Impactador linear em queda livre atingindo uma bola de airbga motorista completamente inflada. Teste utilizado para o desenvolvimento do modelo simplificado de Junyuan et all.

FONTE: Junyuan et all., 2015, p2.

Na figura FIG.2.4 o impactador linear em queda livre representa o movimento do ocupante em direção ao *airbag* partindo de uma velocidade inicial igual a zero, medida em relação à velocidade do veículo em movimento. Por ocasião da colisão o veículo é desacelerado bruscamente e pelo principio fundamental da inércia quando o ocupante atinge o *airbag* ele possui uma velocidade relativa ao carro [17].

Aplicando o princípio fundamental da dinâmica de Newton e a equação do gás ideal Zhang et al [17] chegaram na equação EQ.(2.1) para prever a desaceleração que o *airbag* promove na placa plana. Onde : M_c é a massa da placa e S_c é a área superficial do *airbag* que entra em contato com a placa.

$$a = g - \left(\rho \frac{RT}{M} - p_{atm} \right) \frac{S_c}{M_c} \quad (2.1)$$

O modelo de *airbag* motorista de Zhang et al [17] tem a forma de um esferóide oblato quando está completamente cheio cujas dimensões estão indicadas na figura FIG.2.5 .

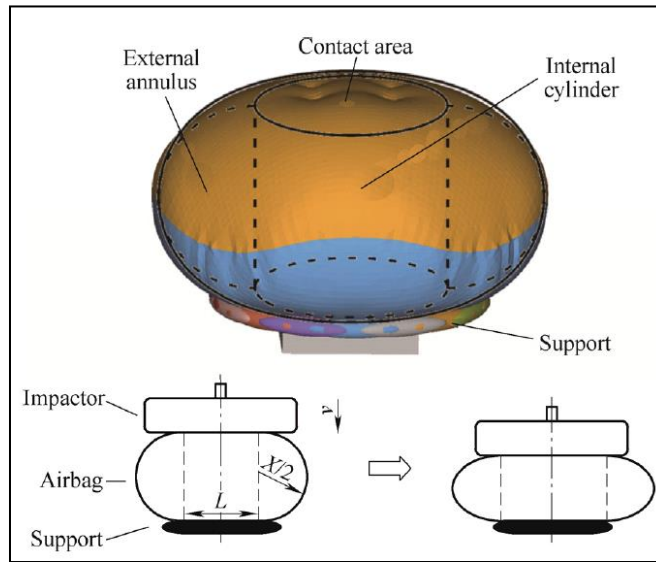


FIGURA 2.7 Modelo geométrico do airbag motorista de Junyuan et all.

FONTE: Junyuan et all., 2015, p3.

Para descrever o fluxo de gás através das fronteiras do sistema à medida em que o airbag é comprimido Zhang et al [17] utilizaram o conceito de quantidade de movimento linear.

Partindo da equação EQ.(2.1), utilizando o princípio da conservação de momentum linear, o conceito básico de densidade como sendo a razão entre a massa e o volume, e aproximando o volume total da bolsa do airbag pelo volume da forma geométrica da figura FIG.2.5 Zhang et al [17] chegaram na equação EQ. (2.2), que foi implementada de forma interativa em linguagem de MATLAB para prever a desaceleração da placa plana a cada instante. A dedução completa da fórmula está no Apêndice A.

$$a = g - \frac{\pi \left(\frac{L}{2}\right)^2}{M_c} \left[\left(\frac{m(t) - 2 \int_0^t \rho A \sqrt{\frac{p - p_{atm}}{\rho}} dt}{\pi \left(\frac{L}{2}\right)^2 X + \int_{\frac{L}{2}}^{L+X} 2\pi x \sqrt{\left(\frac{X}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{L}{2}\right)^2} dx} \right) \frac{RT}{M} - p_{atm} \right] \quad (2.2)$$

Em seu experimento Zhang et al [17] variaram 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. Quando o furo de exaustão de gás utilizado foi muito grande o modelo simplificado em MATLAB não foi capaz de prever com precisão o comportamento do *airbag* pois, neste caso, o impactador linear atinge a bolsa enquanto ela ainda não está completamente inflada.

2.5.2 Modelo de Wen et al.

Os sistemas de amortecimento com o auxílio de *airbags* tem sendo amplamente utilizados 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 [19] desenvolveram 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 conforme ilustrado na figura FIG.2.6.

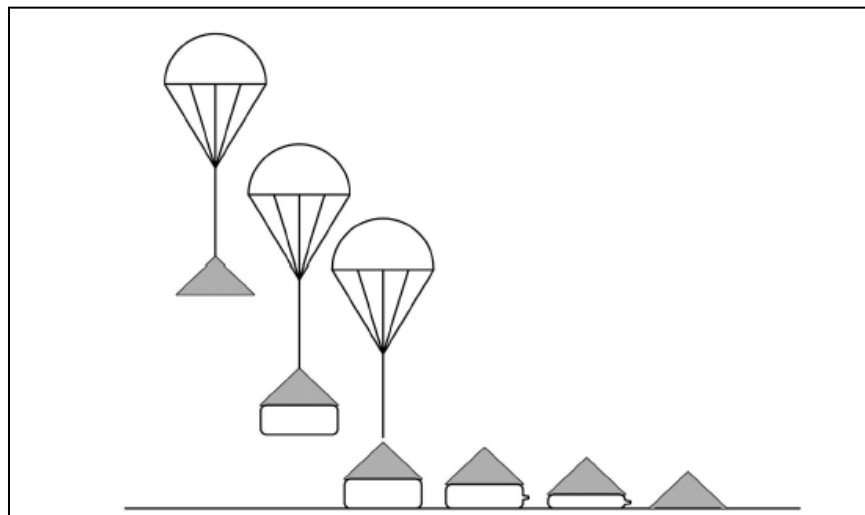


FIGURA 2.8 Pouso de cargas lançadas a partir de aviões suavizado com o auxílio de bolsas de airbag.

FONTE: Wen et al., 2010, p2.

No modelo que Wen et al [19] simularam cada carga deveria aterrisar apoiada sobre quatro bolsas de airbag conforme ilustra a Figura FIG. 2.7 . A Figura FIG.2.8 , por sua vez, ilustra a seção transversal de um airbag ao longo do tempo durante o impacto. As dimensões na FIG.2.8 foram utilizadas por Wen et al para determinar a área de contato entre o *airbag* e o solo e o volume da bolsa ao longo do tempo.

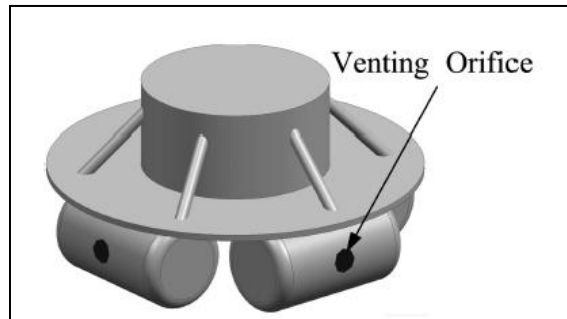


FIGURA 2.9 Sistema de amortecimento com quatro aibags utilizado para suavisar aterrissagem de cargas.

FONTE: Wen et al., 2010, p4.

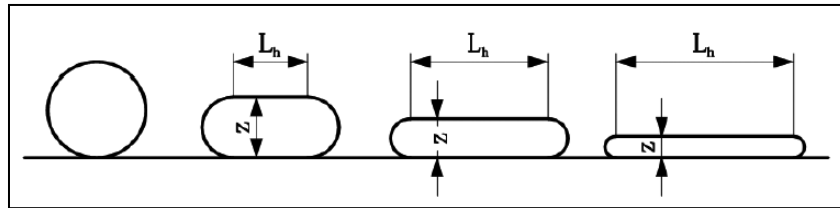


FIGURA 2.10 seção transversal do airbga ao longo do tempo à medida em que ele impacta o solo .

FONTE: Wen et al., 2010, p4.

O modelo analítico desenvolvido por Wen et al [19] tem seus princípios baseados na conservação de energia. Wen et al definiram o seu sistema de amortecimento como sendo composto pela carga, pelo tecido da bolsa e pelo gás no interior do *airbag*. Em seu modelo, o *airbag* está completamente inflado ao atingir o solo, e ao passo em que é comprimido pelo peso da carga o gás em seu interior deixa o sistema através dos furos de exaustão.

Aplicando o princípio da conservação de energia sobre o sistema descrito no parágrafo anterior chega-se na equação EQ.(2.3). Onde: ΔW é o trabalho que a pressão atmosférica exerce sobre o *airbag*, ΔQ é quantidade de energia que deixa a bolsa devido ao fluxo de gás para fora ao passo em que o *airbag* é comprimido, ΔU é a variação da energia interna do gás ΔE_k e ΔE_p são

respectivamente as variações de energia cinética e potencia do sistema e ΔE_f é a variação da energia potencial elástica da bolsa que se dá devido ao seu esticamento.

$$\Delta W + \Delta Q = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta E_f \quad (2.3)$$

Partindo de conceitos básicos de termodinâmica e mecânica clássica os cinco primeiros termos da equação EQ.(2.3) foram determinados. Para determinar ΔE_{el} Wen et al [19] utilizaram o conceito de trabalho da força elástica, considerando de que o tecido é isotrópico para que a lei de Hook Generalizada pudesse ser aplicada e desenvolveram a equação do volume da bolsa baseado na forma geométrica da figura FIG.2.8 chegando-se na EQ.(2.4). Onde z está indicado na FIG.2.8, L_t é o comprimento horizontal do airbag cilíndrico, D é o diâmetro do cilindro horizontal, h_0 é a espessura do tecido do airbag e E é o módulo de Young do tecido.

$$\Delta E_f = \frac{\pi(P-P_{atm})^2}{32h_0ED^2} \left(D + L_t + Dz - \frac{z^2}{2} \right) (8D^2 + z^2 - 4Dz - 8\mu D^2 + 4\mu Dz) \quad (2.4)$$

O balanço de energia geral do sistema de Wen et al está representado na EQ.(2.5). A dedução completa da equação está no Apêndice A.

$$\int -P_{atm} A \dot{z} dt + \int C_p \dot{m} T dt = C_v [m(t)T - m_0 T_0] + M \frac{\dot{z}^2 - z_0^2}{2} + Mg(z - z_0) + \frac{\pi(P-P_{atm})^2}{32h_0ED^2} \left(D + L_t + Dz - \frac{z^2}{2} \right) (8D^2 + z^2 - 4Dz - 8\mu D^2 + 4\mu Dz) \quad (2.5)$$

Wen et al [19] também aplicaram sobre o seu sistema o princípio fundamental da dinâmica de Newton, a equação geral dos gases ideais e uma equação obtida experimentalmente para descrever escoamento isentrópico de um fluido compressível através de um orifício. Com essas equações foi possível montar um sistema não linear o qual foi implementado em linguagem de MATLAB para ser resolvido a partir de valores iniciais. Esse sistema está representado na EQ.(2.6). Onde M é a massa da carga em queda livres, K é uma constante para o furo de exaustão de gás obtida experimentalmente e γ é o coeficiente de expansão adiabática do gás.

$$\left\{ \begin{array}{l} \int -P_{atm} A \dot{z} dt + \int C_p \dot{m} T dt = C_v [m(t)T - m_0 T_0] + M \frac{\dot{z}^2 - z_0^2}{2} + Mg(z - z_0) + \frac{\pi(P - P_{atm})^2}{32n_0 E D^2} (D + L_t + Dz - \frac{z^2}{2}) (8D^2 + z^2 - 4Dz - 8\mu D^2 + 4\mu Dz) \\ M \dot{z} = (P - P_0)A - mg \\ RT = \frac{pV}{m} \\ m = -K A \frac{p}{R\sqrt{T}} \left(\frac{P_t}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{2g \left(\frac{\gamma R}{\gamma-1}\right) \left(1 - \left(\frac{P_t}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)} \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Em seu experimento Wen et al [19] variaram o tecido da bolsa e a área do furo de exaustão de gás a fim de avaliar a influência desses dois fatores sobre os perfis de pressão interna do airbag e de desaceleração da carga ao longo do tempo. As mesmas simulações foram realizadas no programa LS-Dyna. O modelo de Wen et al mostrou uma correlação excelente com a simulação feita no programa comercial. Entretanto, foi feita a consideração de que o *airbag* atinge o solo quando já está completamente inflado. Situações em que a pressão interna do airbag não é uniforme não foram avaliadas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será desenvolvido um modelo matemático capaz de prever o amortecimento de impacto realizado por um airbag motorista de maneira rápida e eficiente por meio da simulação do processo de exaurimento de gás da bolsa a partir do instante em que a mesma já se encontra completamente inflada e posicionada. Para desenvolvimento do modelo serão utilizados conceitos de mecânica clássica. As equações obtidas serão implementadas em linguagem Matlab.

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. 3.1. O motorista será aproximado por uma placa plana de massa 25kg que avança em direção ao *airbag*; o qual, por sua vez, será aproximado por um esferoide oblato originado da junção de dois painéis circulares de 635 mm de diâmetro e com volume máximo aproximado de 45l no instante em que o *airbag* se encontra 100% cheio de gás e posicionado.

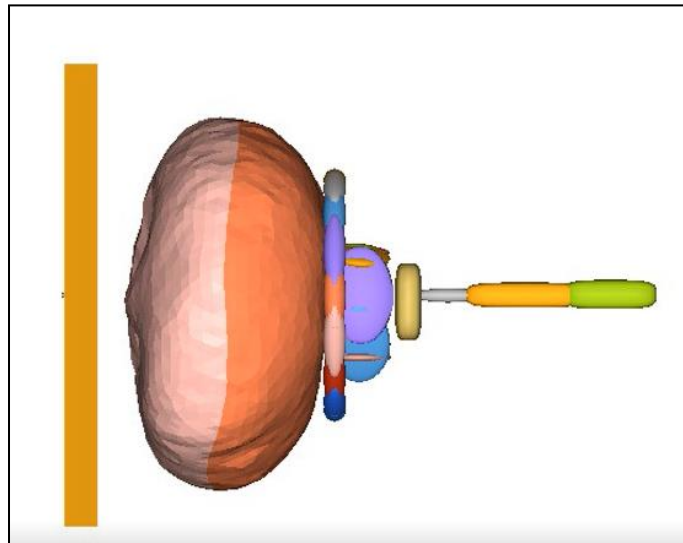


FIGURA 3.1 Ilustração da aproximação da interação entre o motorista e o airbag por uma placa plana e por um esferoide oblato.

A FIG.3.2 ilustra o instante inicial que será considerado para o desenvolvimento dos cálculos. Este momento é o instante imediatamente anterior à colisão entre o *airbag* e a placa sendo que nesse instante o *airbag* está completamente inflado e posicionado.

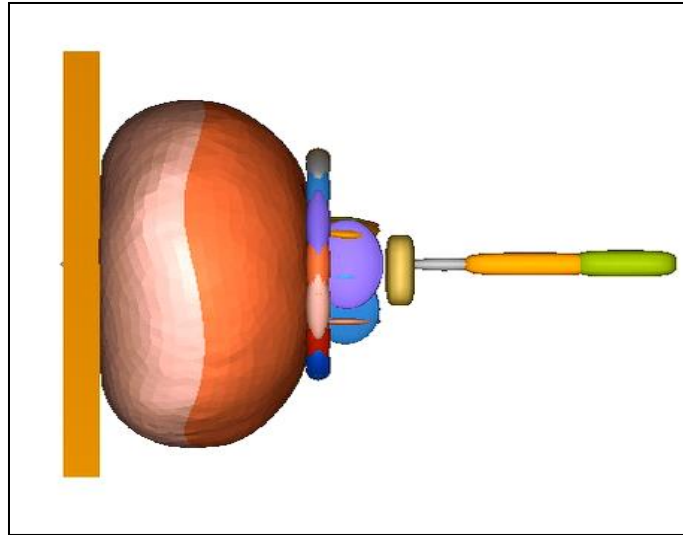


FIGURA 3.2 Ilustração do instante inicial considerado para o desenvolvimento dos cálculos (airbag completamente cheio e posicionado e início da colisão com a placa)

3.1 Considerações gerais para o desenvolvimento do modelo

Uma vez acionado, em decorrência de uma colisão frontal, a bolsa do *airbag* leva, em média, 35ms para estar completamente cheia. No instante imediatamente anterior à colisão com a placa plana o *airbag* já se encontra completamente cheio. Esse instante será considerado o instante inicial para desenvolvimento do método matemático conforme já ilustrado na FIG. 3.2.

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. 3.3 ilustra a compressão do *airbag* ao passo que a placa avança.

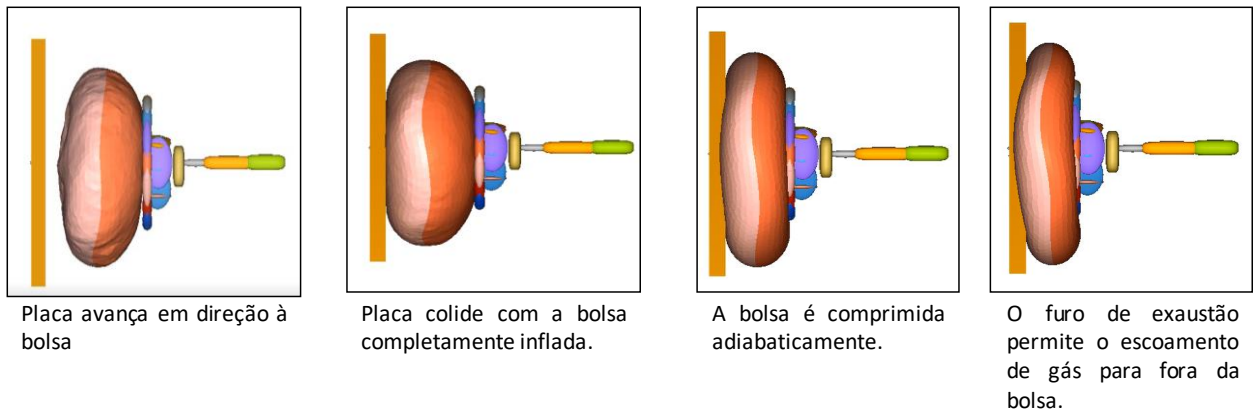


FIGURA 3.3 compressão do airbag ao passo que a placa avança em direção à bolsa.

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

- I. A placa plana avança horizontalmente e a deformação da bolsa do *airbag* é simétrica ao entrar em contato com a mesma.
- II. 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.
- III. A bolsa possui um furo de exaustão de gás com área constante.
- IV. A composição do gás que preenche o *airbag* se aproxima de um gás ideal monoatômico.

3.1.1 Definição do sistema

O sistema em avaliação é definido como a bolsa do *airbag* completamente inflada, o gás em seu interior (N_2) e a placa plana que avança em direção à bolsa.

3.1.2 Modelo do esferóide

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. Devido à consideração de deformação

simétrica em todas as direções. A FIG.3.4 ilustra a seção transversal da bolsa nos planos zx e yx com decorrer do tempo.

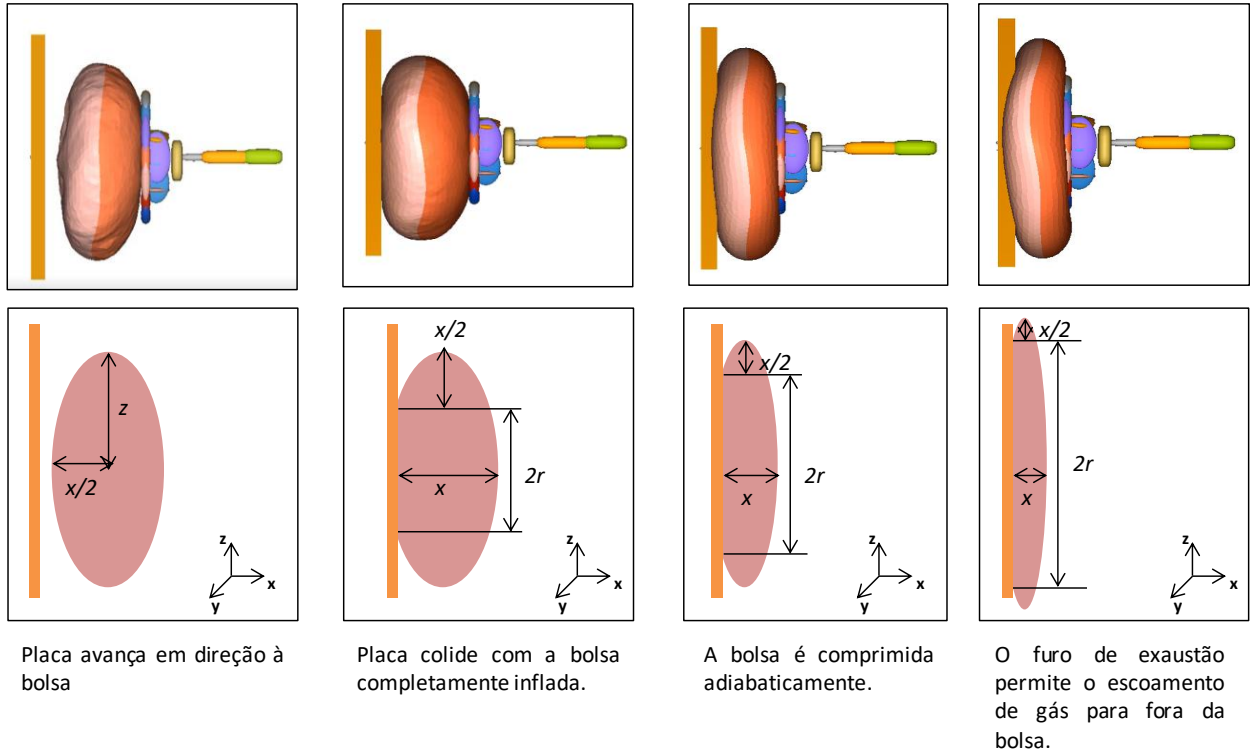


FIGURA 3.4 Ilustração da seção transversal da bolsa do airbga à media em que a placa avança. A seção transversal representa tanto o corte no plano yx , quanto no plano yz uma vez que a deformação do airbga é uniforme.

Em que :

$x = f(t)$ Representa o eixo secundário do esferóide oblato, espera-se que x nunca atinja o valor mínimo de zero pois nesse caso haveria contato entre o ocupante a as partes rígidas do veículo.

$z = f(t)$ Representa o eixo principal do esferóide oblato.

$r = f(t)$ 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 Gudin “O volume de um sólido de revolução é igual ao produto da área da superfície geratriz pelo comprimento do caminho percorrido pelo centróide dessa mesma superfície ao longo do ângulo que gera o volume”. Deste modo, o volume da bolsa em qualquer instante pode ser determinado pela revolução completa da FIG. 3.5 em torno do eixo x .

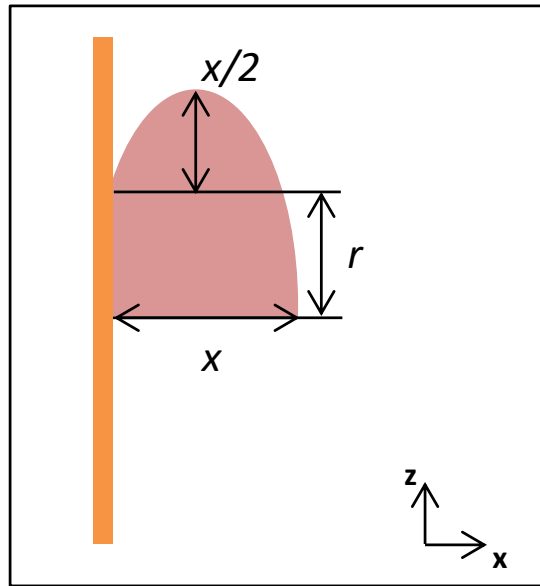


FIGURA 3.5 Área da superfície cuja revolução completa entorno do eixo x possibilita calcular o volume do airbag em qualquer instante.

A EQ.(3.1) indica como pode ser calculada a área superficial da FIG.3.5.

$$A_{total} = \frac{1}{2}A_{semicirculo} + A_{retangulo} \quad (3.1)$$

$$A_{total} = \frac{1}{2}\pi \left(\frac{x}{2}\right)^2 + rx \quad (3.2)$$

$$A_{total} = \pi \frac{x^2}{8} + rx \quad (3.3)$$

A EQ.(3.4) permite determinar o centroide da FIG.3.5.

$$I_{Total} = \frac{\frac{1}{2}A_{semicirculo}I_{semicirculo} + A_{Retangulo}I_{Retangulo}}{\frac{1}{2}A_{semicirculo} + A_{Retangulo}} \quad (3.4)$$

$$I_{Total} = \frac{\left[\frac{1}{2}\pi\left(\frac{x}{2}\right)^2\right]I_{semicirculo} + (rx)I_{Retângulo}}{\left(\frac{1}{2}\pi\left(\frac{x}{2}\right)^2 + rx\right)} \quad (3.5)$$

$$I_{Total} = \frac{\left(\pi\frac{x^2}{8}\right)I_{semicirculo} + (rx)I_{Retângulo}}{\left(\pi\frac{x^2}{8} + rx\right)} \quad (3.6)$$

$$I_{Total} = \frac{\left(\pi\frac{x^2}{8}\right)\frac{4}{3\pi}\left(\frac{x}{2}\right) + (rx)\frac{r}{2}}{\left(\pi\frac{x^2}{8} + rx\right)} \quad (3.7)$$

$$I_{Total} = \frac{\left(\pi\frac{x^2}{8}\right)\frac{4}{6\pi}x + (rx)\frac{r}{2}}{\left(\pi\frac{x^2}{8} + rx\right)} \quad (3.8)$$

$$I_{Total} = \frac{\frac{x^3}{12} + \left(\frac{r^2x}{2}\right)}{\left(\pi\frac{x^2}{8} + rx\right)} \quad (3.9)$$

Aplicando o teorema de Pappus Gudin o volume da bolsa em qualquer instante pode ser calculado pelo produto das equações EQ.(3.3), EQ.(3.9) e 2π (ou seja, uma revolução completa)

$$V_{Total} = 2\pi \left(\pi\frac{x^2}{8} + rx\right) \frac{\frac{x^3}{12} + \left(\frac{r^2x}{2}\right)}{\left(\pi\frac{x^2}{8} + rx\right)} \quad (3.10)$$

$$V_{Total} = 2\pi \left[\frac{x^3}{12} + \left(\frac{r^2x}{2}\right)\right] \quad (3.11)$$

$$dV_{Total} = \left[\frac{x^3}{12} + \left(\frac{r^2x}{2}\right)\right] d\theta \quad (3.12)$$

3.1.3 Equação do gás ideal

Uma vez estabelecida a consideração de que o gás nitrogênio no interior da bolsa tem comportamento de gás ideal é possível aplicar a EQ.(3.13) que varia com o tempo.

$$PV = mRT \quad (3.13)$$

$$P = \frac{mRT}{V} \quad (3.14)$$

Onde:

$P = f(t)$ 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

R corresponde a constante dos gases ideais para o nitrogênio

3.1.4 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. 3.6 permite verificar que a EQ.(3.15) representa o perímetro da seção transversal da bolsa a cada instante.

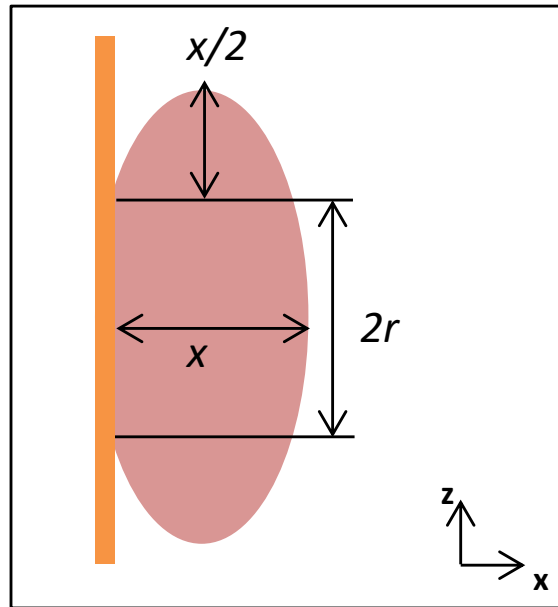


FIGURA 3.6 Esquema das dimensões da seção trasnversal da bolsa.

$$2D = 4r + x\pi \quad (3.15)$$

$$r = \frac{D}{2} - \frac{x\pi}{4} \quad (3.16)$$

Onde:

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

3.1.5 Equação da vazão de gás para fora da bolsa

A EQ.(3.17) representa a massa de gás que atravessa as fronteiras da bolsa através do furo de vazão em um intervalo de tempo infinitesimal.

$$dm = A\rho w dt \quad (3.17)$$

$$dm = A \frac{P}{RT} w dt \quad (3.18)$$

Em que :

A corresponde a área do furo de vazão

$\rho = f(t)$ corresponde a densidade do gás a cada instante

w corresponde a velocidade com que o gás atravessa o furo de vazão

$P = f(t)$ corresponde a pressão dentro da bolsa em cada instante

T corresponde a temperatura do gás dentro da bolsa

R corresponde a constante dos gases ideais para o nitrogênio

A mecânica clássica estabelece que 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 EQ. (3.19)

$$w \, dm = (P - P_{atm})A \, dt \quad (3.19)$$

Dividindo a EQ.(3.19) pela EQ.(3.18) é possível determinar a velocidade com a qual o gás deixa a bolsa através do furo de vazão.

$$\frac{w \, dm}{dm} = \frac{(P - P_{atm})A \, dt}{A \frac{P}{RT} w \, dt} \quad (3.20)$$

$$w^2 = \frac{(P - P_{atm})}{P} RT \quad (3.21)$$

$$w = \sqrt{\frac{(P - P_{atm})}{P} RT} \quad (3.22)$$

Substituindo a EQ.(3.22) em EQ.(3.18) chega-se na EQ.(3.25) que determina a massa de gás dentro da bolsa a qualquer momento como uma função do tempo.

$$dm = A \frac{P}{RT} \sqrt{\frac{(P - P_{atm})}{P} RT} \, dt \quad (3.23)$$

$$m_{t_{n+1}} = m_{t_n} - \int_0^t A \frac{P}{RT} \sqrt{\frac{(P-P_{atm})}{P}} RT dt \quad (3.24)$$

$$m_{t_{n+1}} = m_{t_n} - \Delta t A \frac{P}{RT} \sqrt{\frac{(P-P_{atm})}{P}} RT \quad (3.25)$$

3.1.6 Equação do avanço da placa em direção á bolsa

A cada intervalo de tempo infinitesimal o balanço de forças do sistema obedece à segunda lei de Newton. A massa do *airbag* pode ser considerada desprezível se comparada à massa da placa. 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 EQ. (3.27).

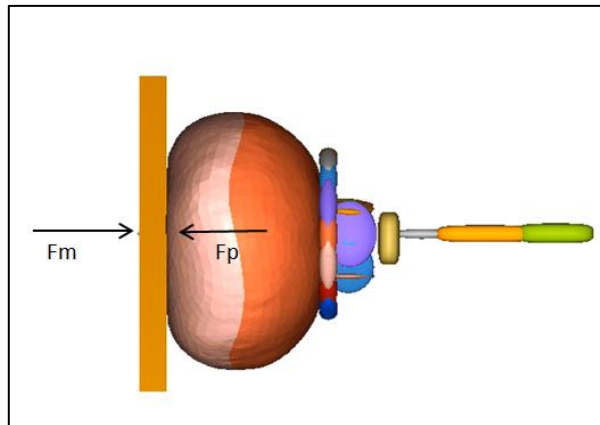


FIGURA 3.7A placa plana exerce uma força contra a superfície do airbag em contato com ela à medida em que avança.

$$Ma = -(P - P_{atm})\pi r^2 \quad (3.26)$$

$$a = \frac{-(P - P_{atm})\pi r^2}{M} \quad (3.27)$$

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.

$r = f(t)$ Representa o raio da área de contato entre a bolsa e placa a cada instante.

3.1.7 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 EQ.(3.29). Sendo x a intrusão da placa sobre o *airbag* a EQ.(3.29) expressa a posição da placa a cada instante

$$\Delta x = v_{t_n} \Delta t + \frac{a_{t_n}}{2} \Delta t^2 \quad (3.28)$$

$$x_{t_{n+1}} = x_{t_n} - \Delta x \quad (3.29)$$

A velocidade da placa a cada instante é expressa pela equação EQ.(3.30).

$$v_{t_{n+1}} = v_{t_n} + a_{t_{n+1}} \Delta t \quad (3.30)$$

3.1.8 Sistema de equações

Todo o desenvolvimento matemático realizado até este ponto possibilita montar o sistema de equações sequenciais EQ.(3.31) foi implementado em linguagem de MATLAB e resolvido a partir de valores iniciais.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{t_{n+1}} = m_{t_n} - \Delta t A \frac{P_{t_n}}{RT} \sqrt{\frac{(P_{t_n} - P_{atm})}{P_{t_n}}} RT \\ x_{t_{n+1}} = x_{t_n} - v_{t_n} \Delta t - \frac{a_{t_n}}{2} \Delta t^2 \\ r_{t_{n+1}} = \frac{D}{2} - \frac{x_{t_{n+1}} \pi}{4} \\ V_{t_{n+1}} = 2\pi \left[\frac{(x_{t_{n+1}})^3}{12} + \left(\frac{(r_{t_{n+1}})^2 x_{t_{n+1}}}{2} \right) \right] \\ P_{t_{n+1}} = \frac{m_{t_{n+1}} RT}{V_{t_{n+1}}} \\ a_{t_{n+1}} = \frac{-(P_{t_{n+1}} - P_{atm}) \pi (r_{t_{n+1}})^2}{M} \\ v_{t_{n+1}} = v_{t_n} + a_{t_{n+1}} \Delta t \end{array} \right. \quad (3.31)$$

A Figura FIG.3.8 representa o esquema do fluxo de dados em que o problema deve ser resolvido. As tabelas TAB. 3.1 e TAB.3.2 contém respectivamente a descrição das constantes do problema e dos valores iniciais utilizados no problema iterativo.

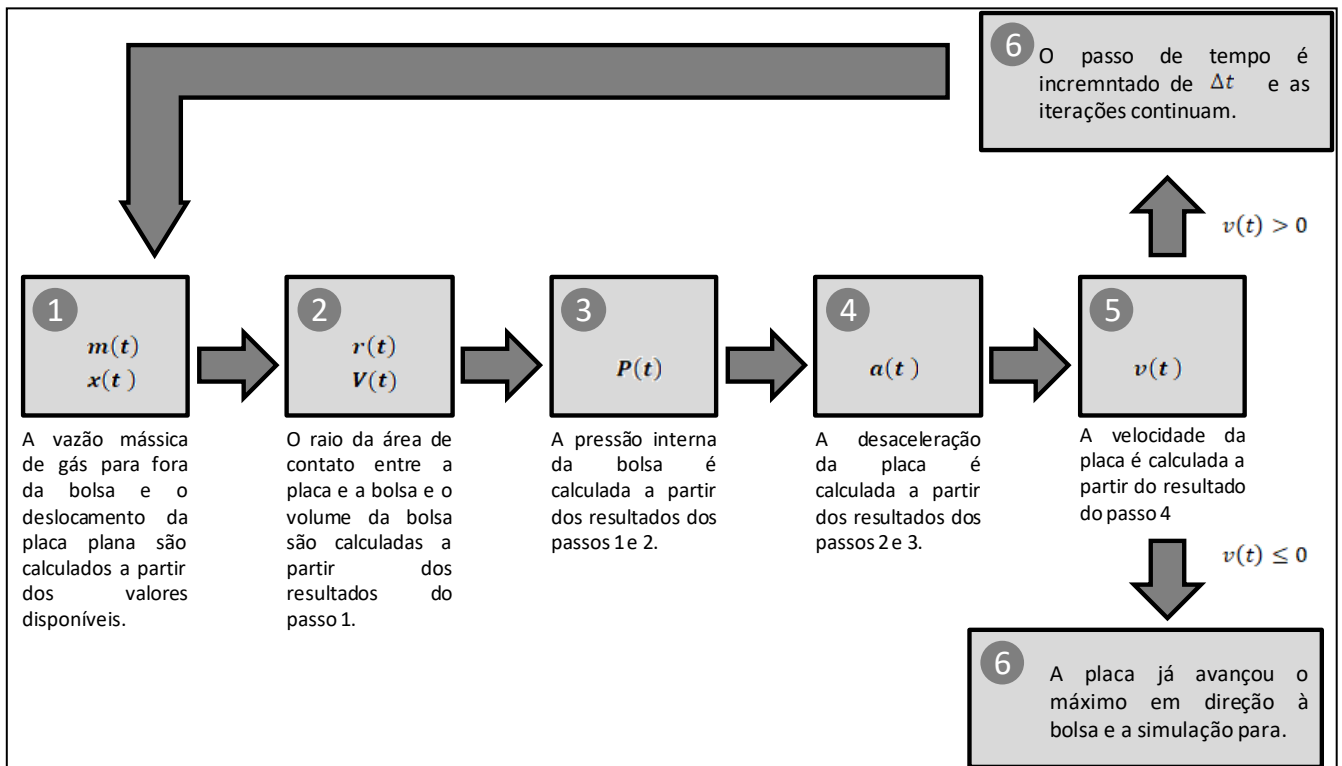


FIGURA 3.8 Esquema do fluxo de dados para a resolução do sistema de valor inicial da EQ.(3.31)

TABELA 3.1 Lista de constantes do sistema de equações EQ.(3.31)

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	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 airbag	0.635 [m]

TABELA 3.2 Lista de valores iniciais para resolver de form aiterativa o sistema EQ.(3.31)

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 esferóide oblato	0.435 [m]

3.2 Desenvolvimento do modelo em MATLAB de exaurimento de gás do airbag.

O sistema de equações EQ.(3.31) foi implementado em linguagem MATLAB conforme mostrado na FIG.3.9.

```

clc;
clear all;
fprintf('Constantes: \n');
fprintf('Cp = capacidade calorífica do nitrogênio a pressão constante[J/(K.kg)]\n');
Cp = 1057.1;
fprintf('T = temperatura no interior da bolsa [K]\n');
T = 500;
fprintf('R = Constante universal do gás ideal para o nitrogênio[J/(K.kg)]\n');
R = 296.928;
fprintf('M = massa da placa plana [kg]\n');
M = 25;
fprintf('Patm = pressão atmosférica [Pa] \n');
Patm = 101325;
D = 0.635;
fprintf('d = diametro do furo de vazão da bolsa [m] \n\n');
d = input('entre com o diametro do furo de vazão da bolsa em [m] \n\n');
fprintf('A = area do furo de vazão da bolsa [m2] \n\n');
A = (1 / 4) * pi * d ^ 2 ;
fprintf('Variável independente: \n');
fprintf('t = tempo decorrido a partir do momento em que o ocupante encontra a bolsa [s]\n\n');
t(1) = 0.035;
fprintf('Variáveis dependentes: \n');
fprintf('m = massa de gás dentro da bolsa a cada instante [kg]\n');
fprintf('P = pressão interna da bolsa a cada instante [Pa] \n');
fprintf('a = desaceleração da placa plana a cada instante [m/s2]\n');
fprintf('v = velocidade da placa plana a cada instante [m/s]\n');
fprintf('r = raio da área de contato entre a bolsa e a placa a cada instante [m]\n');
fprintf('x = eixo secundário do esfeóide oblato a cada instante [m] \n');
fprintf('Condições iniciais \n');
fprintf('a(1) = desaceleração da placa plana no instante inicial [m/s2]\n');
a(1) = 0;
fprintf('v(1) = velocidade inicial da placa [m/s]\n');
v(1) = 6.193;
fprintf('x(1) = eixo secundário inicial do esfeóide oblato [m] \n');
x(1) = 0.435;
fprintf('r(1) = raio inicial da área de contato entre a bolsa e a placa [m]\n');
r(1) = (D / 2) - (pi * x(1))/4;
fprintf('V(1) = volume da bolsa [m3]\n');
V(1) = 2 * pi * (((x(1)^3)/12) + ((x(1)*r(1)^2)/2))
fprintf('m(1) = massa inicial de gás dentro da bolsa [kg]\n');
m(1) = input('entre com a massa inicial de gás em [Kg] \n\n');
fprintf('P(1) = pressão interna inicial da bolsa [Pa] \n');
P(1) = (m(1)*R * T) / (V(1));
deltat = 0.001;

b = 1;

while v(b) > 0
    t(b + 1) = t(b) + deltat;
    m(b + 1) = m(b) - ((A* deltat * P(b)) / (R * T))* sqrt((R*T* (P(b) - Patm)) / P(b));
    x(b + 1) = x(b) - v(b)* deltat - (a(b)* deltat^2)/2 ;
    r(b + 1) = (D / 2) - (pi * x(b + 1))/4 ;
    V(b + 1) = 2 * pi * (((x(b + 1)^3)/12) + ((x(b + 1)*r(b + 1)^2)/2));
    P(b + 1) = ( m(b + 1) * R * T ) / V(b + 1) ;
    a(b + 1) = -((P(b+1) - Patm) * pi * r(b)^2) / M;
    v(b + 1) = v(b) + a(b + 1) * deltat;
    b = b + 1;
end

```

FIGURA 3.9 Implementação em linguagem MATLAB do sistema de equações EQ.(3.31)

3.3 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 o parâmetro biomecânico mais importante relacionado ao *airbag* é a desaceleração máxima sofrida pela cabeça. Deste modo, foi avaliada a influência do diâmetro do furo de exaustão de gás e da massa e gás dentro da bolsa no instante imediatamente inicial á colisão sobre a desaceleração sofrida pela placa plana. O contato rígido entre o ocupante e o volante também é um resultado bastante crítico, deste modo, avaliou-se também a distância mínima entre a placa plana e o volante resultante do final do processo de amortecimento. A tabela TAB. 3.3 contém a matriz que caracteriza as 20 simulações realizadas.

TABELA 3.3 - Matriz das simulações avaliadas

Simulação		Diâmetro do furo de Exaustão (mm)					
		0,040	0,035	0,030	0,025	0,020	0,015
Massa de Gás (kg)	0,035	1	2	3	4	5	6
	0,040	7	8	9	10	11	12
	0,045	13	14	15	16	17	18
	0,050	15	16	17	18	19	20

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 [17]. 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 desenvolveram um modelo a partir do princípio da conservação de energia e da lei dos gases ideais e correlacionaram com os resultados de simulação obtidos a partir do programa Madymo.

O modelo de Zhang et al demonstrou ser preciso para simular o processo de 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 [17]. Entretanto, em situações mais extremas, em que o diâmetro do furo de exaustão era muito grande e usado em conjunto com uma condição externa de muito ou de pouco gás no interior da bolsa o desvio chegou a 17% [17].

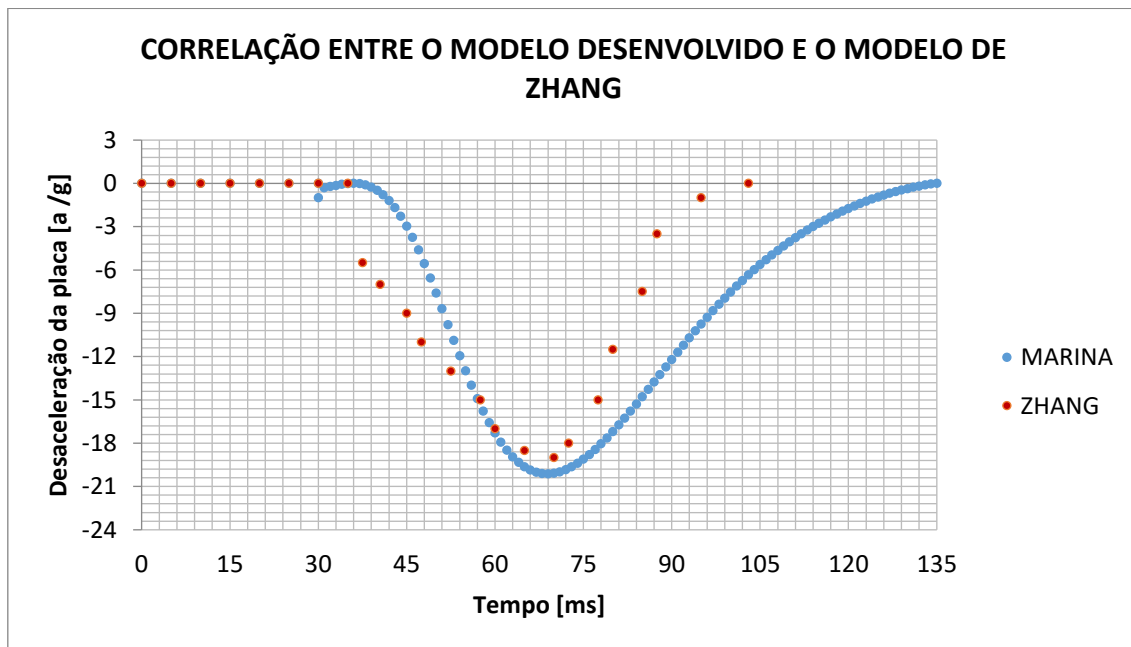
O gráfico GRA.4.1 contém as curvas de desaceleração em função do tempo obtidas a partir do trabalho de Zhang e do modelo desenvolvido neste trabalho. A fim de comparar os dois modelos foram utilizados parâmetros de massa inicial de gás dentro da bolsa e furo de exaustão de gás iguais a 0.04 kg e 0.035 mm respectivamente, esses parâmetros foram utilizados uma vez que apresentam correlação com os resultados obtidos em Madymo com desvio de 1.5%.

A tabela TAB.4.1 compara os picos de desaceleração obtidos através do modelo de Zhang e do modelo desenvolvido nesse trabalho nas condições descritas no parágrafo anterior. A diferença entre os dois modelos é menor que 6%.

TABELA 4.1 Comparação dos picos de desaceleração entre os modelos de Zhang e marina para um furo de exaustão de gás de 0.35mm e massa inicial de gás de 0.040kg

	Desaceleração máxima		
	Modelo Zhang	Modelo Marina	Erro
Massa de Gás 0.040 kg			
Diâmetro do furo de Exaustão 0,035mm	-19 g após 70ms	- 20,13 g após 69ms	5,95%

GRÁFICO 4.1 Comparação do modelo desenvolvido com o trabalho de Zhang



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

No dimensionamento de *airbags* o diâmetro do 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 costuma ajudar a diminuir a rigidez da bolsa e de consequência a desaceleração sofrida pelo ocupante. Da mesma forma, quando a bolsa do *airbag* está muito macia a distância entre o ocupante e o volante imediatamente após o amortecimento da colisão pode ser muito pequena; e existe risco de contato direto motorista - volante em uma situação de colisão real. Neste caso, diminuir o diâmetro do furo de exaustão pode ser um opção para melhorar a resposta biomecânica do ocupante.

A variação do *out put* 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 utilizado durante o dimensionamento de *airbags* 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, diminuir o *out put* do gerador ajuda a diminuir a rigidez da bolsa e de consequência a desaceleração sofrida pelo ocupante. Da mesma forma, quando a bolsa do *airbag* está muito macia a distância entre o ocupante e o volante imediatamente após o amortecimento da colisão pode ser muito pequena; com risco de contato direto motorista - volante em uma situação de colisão real. Neste caso, aumentar o *out put* do gerador pode favorecer a biomecânica.

Alterações em geradores de gás configuram uma opção secundária para otimização da performance biomecânica dos *airbags* e raramente a indústria opta por esse método. Isso acontece; porque, os impactos de custo e tempo para troca de uma gerador são bem maiores que os impactos para variação do furo de exaustão de gás da bolsa. Deste modo, existe uma preocupação muito grande em se certificar de que a performance de um *airbag* é sensível à variações de furo de exaustão nas etapas mais iniciais do projeto quando ainda não foi lançada nenhuma ferramenta para construção dos *airbags*. Todavia, em casos externos, pode ser necessário a alteração do gerador de gás a fim de atingir uma condição aceitável de resposta biomecânica do ocupante em caso de colisão.

Os gráfico GRA.4.2 a GRA.4.5 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.

GRÁFICO 4.2 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.035kg

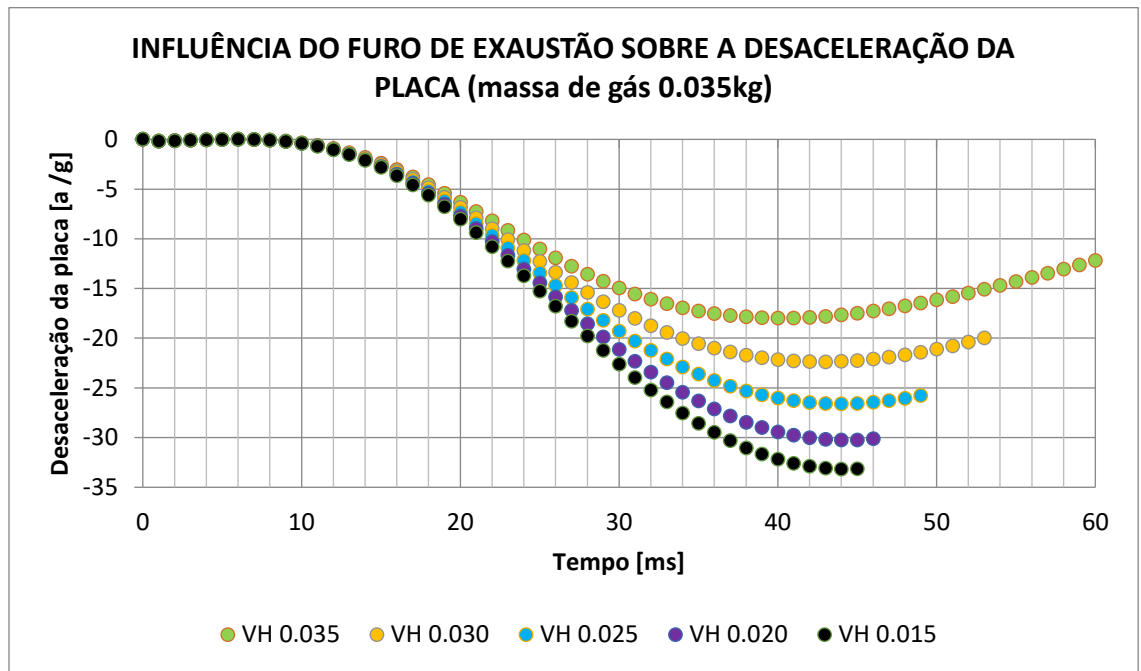


GRÁFICO 4.3 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.040kg

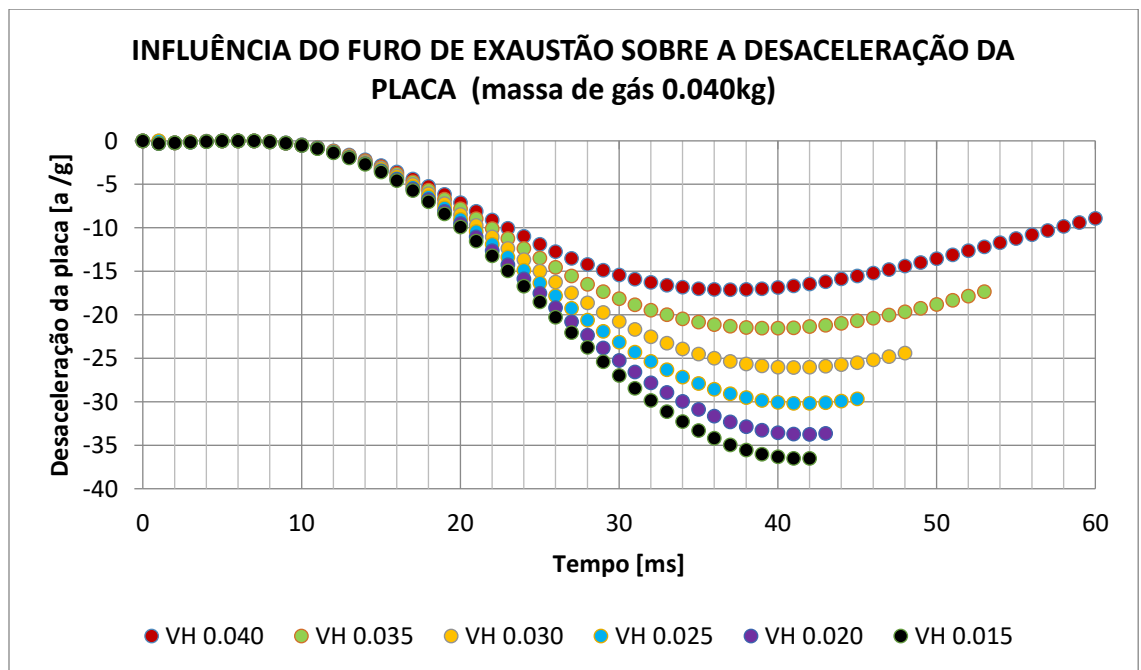


GRÁFICO 4.4 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.045kg

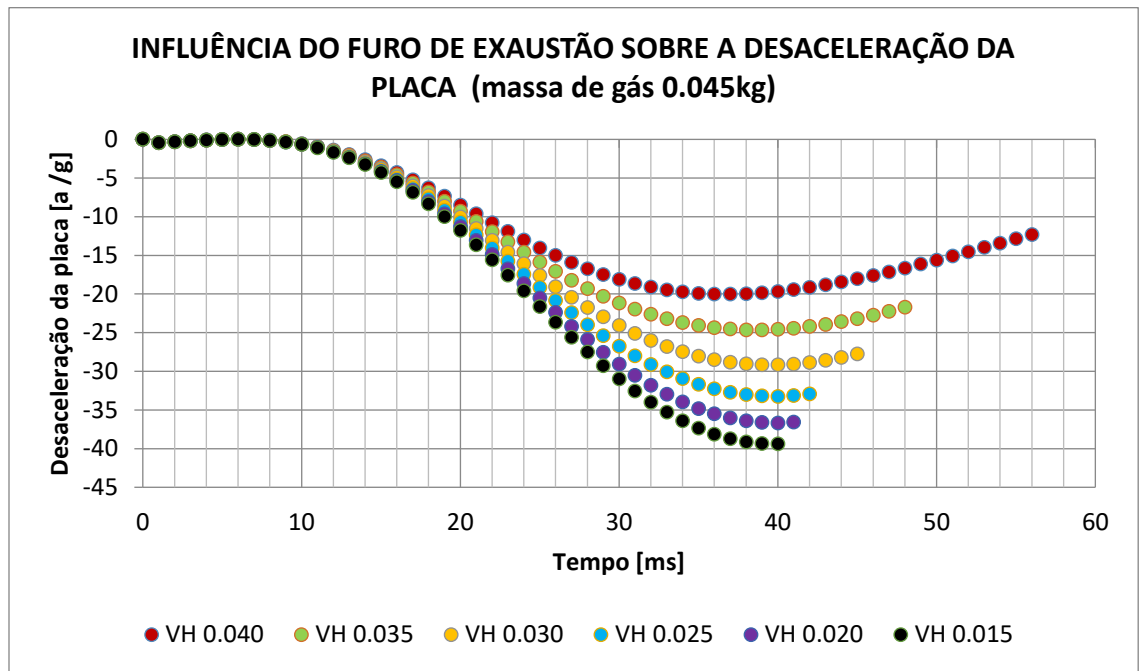
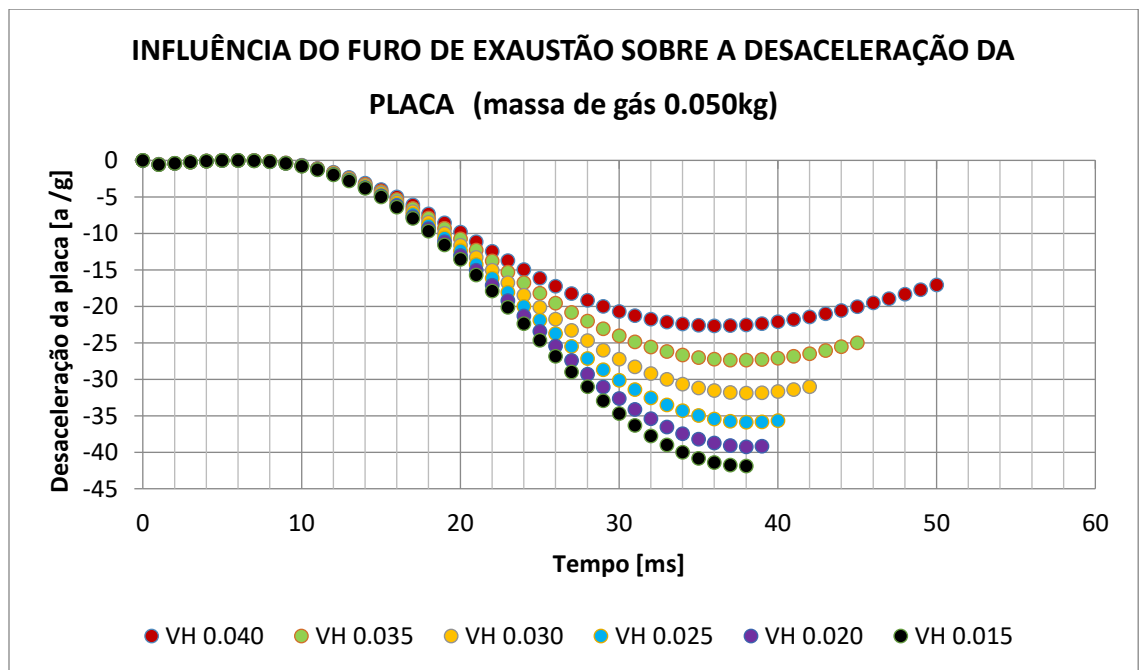


GRÁFICO 4.5 Influência do furo de exaustão de gás sobre a desaceleração da placa plana ao longo do tempo para uma massa inicial de gás de 0.050kg



Em todas as condições de massa inicial de gás dentro da bolsa ao passo em que o furo de exaustão aumenta de diâmetro a curva de desaceleração da cabeça fica mais suave, 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 os picos de desaceleração variam substancialmente entre *airbags* com furos de exaustão extremos. É possível notar a partir dos dados da tabela TAB.4.2 que ao aumentar o furo de exaustão de 0.015mm para 0.040mm o pico de desaceleração da placa cai em cerca de 19g para todas as condições de massa inicial de gás dentro da bolsa.

As combinações de massa de gás – diâmetro do furo de exaustão indicadas na tabela TAB.3.3 e utilizadas para as simulações deste trabalho contém a grande maioria dos cenários usuais de configuração de *airbags* em situações reais da indústria automotiva, e para esses cenários o modelo desenvolvido se mostrou sensível à variação de diâmetro do furo de exaustão.

A tabela TAB 4.2 é um resumo das informações dos gráfico GRA.4.2 a GRA.4.5 , ela ilustra como o furo de vazão de gás influencia na desaceleração máxima sofrida pela placa para diversas condições de massa inicial de gás dentro da bolsa.

TABELA 4.2 Influência do furo de vazão sobre a desaceleração máxima sofrida pela bolsa.

Desaceleração máxima		Diâmetro do furo de Exaustão (mm)					
		0,040	0,035	0,030	0,025	0,020	0,015
Massa de Gás (kg)	0,035	-	-17,99	-22,39	-26,61	-30,26	-33,17
	0,040	-17,14	-21,54	-26,06	-30,20	-33,74	-36,53
	0,045	-20,04	-24,66	-29,17	-33,25	-36,69	-39,39
	0,050	-22,68	-27,39	-31,89	-35,88	-39,25	-41,9

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

A tabela TAB 4.3 ilustra como o diâmetro furo 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.

TABELA 4.3 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)					
		0,040	0,035	0,030	0,025	0,020	0,015
Massa de Gás (kg)	0,035	-	189,52	206,78	217,02	223,76	228,37
	0,040	188,31	211,21	223,3	231,15	236,56	240,34
	0,045	210,27	225,72	235,17	241,63	246,25	249,46
	0,050	224,51	236,48	244,33	249,87	253,89	259,71

Como legislação, a fim de atender a resolução 201 do CONTRAN, 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 50g.

4.4 Condição de contato placa – *airbag* quando a bolsa não está completamente inflada

Neste trabalho foi considerado uma situação ideal em que a placa plana atinge o *airbag* imediatamente após o instante em que ele se encontra completamente inflado e posicionado. Entretanto, em uma colisão, essa pode não ser a condição real. O contato entre o ocupante e o *airbag* pode se dar quando a bolsa ainda não está completamente cheia. Situações como essa ocorrem; por exemplo, quando o motorista e/ou o passageiro estão sem sinto de segurança ou quando uma criança é transportada no banco da frente. Nesse tipo de contato a absorção da energia cinética do ocupante não é otimizada e pode haver danos graves em decorrência de picos elevados de desaceleração do ocupante. Para situações em que o ocupante atinge o *airbag* quando a bolsa

não está completamente inflada e posicionada o modelo desenvolvido não é aplicável para descrever o fenômeno.

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, o gás em seu interior (N_2) 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 deformações 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, sem atrito e sem perda de calor, e a distribuição de temperatura no interior da bolsa é uniforme.

O modelo desenvolvido foi correlacionado com o modelo de Zhang et al [17] com desvio menor que 6% se mostrando eficiente para prever a 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, que variou entre 0,015mm e 0,040mm, e massa inicial de gás dentro da bolsa, que variou entre 0.035 kg e 0.050 kg. Em todas as configurações avaliadas a desaceleração da placa plana se mostrou sensível à variações de diâmetro do furo de exaustão, aumentando à medida em que o diâmetro do furo diminui e diminuindo à medida em que o diâmetro do furo aumenta.

O modelo foi desenvolvido para prever o comportamento de um *airbag* motorista em forma de um esferóide 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*.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Bendjaballah et al. **Numerical analysis of side airbags deployment in out-of-position situations.** International Journal of Mechanical and Materials Engineering 12:12 DOI 10.1186/s40712-016-0070-2. 2017.
- [5] 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.
- [6] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução CONTRAN N° 312, de 03 de abril de 2009.** Acesso em: 06/04/2018. Disponível em: http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/RESOLUCAO_CONTRAN_311_09.pdf.
- [7] ESI – GROUP. **Eberhard Haug, Co-founder of ESI Group, speaks about the origins of PAM-CRASH, ESI’s first flagship software, and recount tales of ESI’s first car crash simulation for Volkswagen, in 1985** Acesso em : 05/04/2019 . Disponível em : <https://www.esi-group.com/pt/pam-crash>.

- [8] 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.
- [9] LATIN AMERICAN & CARRIBEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME. **Assessment protocol – Adult occupant protection 2016** Acesso em: 06/01/2019. Disponível em: http://www.latinncap.com/data/descargas/Latin%20NCAP%20Adult%20Assessment%20Protocol%20v3_2%20Nov%202016%20front%20and%20side.pdf
- [10] LATIN AMERICAN & CARRIBEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME. Resultado Ford Ka / Figo + 2 Airbags Outubro 2017. Acesso em: 03/04/2019. Disponível em: file:///C:/Users/Owner/Downloads/Ford_KaFigo_2Airbags_po.pdf
- [11] 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
- [12] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). **LS- DYNA**. Acesso em : 05/04/2019. Disponível em : <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>
- [13] Marklund, P.O.; Nilsson L.. **Simulation of airbag inflation processes using a coupled fluid structure approach**. Computational Mechanics 29 (2002) 289–297. Springer-Verlag 2002 DOI 10.1007/s00466-002-0341-z .202.
- [14] 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.

- [15] 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 (2008) 885–899. 2008.
- [16] TASS International. **Cost-effective safety design software.** Acesso em : 05/04/2019 . Disponível em : <https://tass.plm.automation.siemens.com/madymo>.
- [17] ZHANG, J. ; JIN, Y. ; XIE, L.; CHEN , C.. **Establishment and Validation for the Theoretical Model of the Vehicle Airbag.** CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING Vol. 28,aNo. 3,a. DOI: 10.3901/CJME.2015.0312.029. 2015.
- [18] 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, 2015, 58: 397404, DOI: 10.1007/s11431-014-5758-z. 2015.
- [19] 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 (2010) 1535–1545 1535 DOI 10.3233/JAE-2010-1282. 2010.
- [20] WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Decade of Action for Road Safety 2011–2020 Saving millions of lives.** Acesso em: 06/04/2018. Disponível em:https://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/saving_millions_lives_en.pdf?ua=1.
- [21] WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Relatório Global sobre o estado da segurança viária 2015.** Acesso em: 06/04/2018. Disponível em: https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/Summary_GSR_RS2015_POR.pdf .

7 APÊNDICE A

7.1 Cálculo do critério de lesão da cabeça

O HIC é um adimensional calculado através da equação EQ. (A.1) que estima a probabilidade de lesões na cabeça como consequência de um impacto. Para o seu cálculo é levado em consideração o pico de desaceleração sofrido pela cabeça medido em g e a duração dessa desaceleração. Onde a é a aceleração resultante medida em unidade de aceleração da gravidade, e $(T_2 - T_1)$ é o intervalo de tempo medido em segundos entre o início e o fim de um pico.

$$HIC = (T_2 - T_1) \left[\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} a \cdot dt \right]^{2.5} \quad (A.1)$$

$$HIC = (T_2 - T_1) \left[\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [a_x^2 + a_y^2 + a_z^2]^{0.5} \cdot dt \right]^{2.5} \quad (A.2)$$

7.2 Cálculo do critério de viscosidade do tórax

O critério de viscosidade do tórax representado pela EQ. (A.5) é expresso em metros por segundo e pode ser calculado pelo produto instantâneo das equações EQ. (A.3) e EQ. (A.4) abaixo. Onde $D(t)$ é a compressão do esterno no instante t [m], $C(t)$ é a resposta da compressão do esterno no instante t e $V(t)$ é a velocidade de deflexão do esterno no instante t [m/s].

$$C(t) = \frac{D(t)}{0,229} \quad (A.3)$$

$$V(t) = \frac{8 \times (D(t+1) - D(t-1)) - (D(t+2) - D(t-2))}{12\delta t} \quad (A.4)$$

$$(C \times V)(t) = 1,3 \times V(t) \times C(t) \quad (A.5)$$

7.3 Dedução do modelo de Zhang et all.

Aplicando o princípio fundamental da dinâmica de Newton ao sistema da placa em queda livre Zhang et all [17] chegou na equação EQ.(A.6). Onde: a é a desaceleração da placa , g é a aceleração da gravidade local, M_c é a massa da placa plana e S_c é a área da superficial do airbag que entra em contato com a placa.

$$M_c g - (p - p_{atm}) S_c = M_c a \quad (\text{A.6})$$

Isolando a variável da aceleração no lado esquerdo tem-se a EQ. (A.7).

$$a = g - \frac{(p - p_{atm}) S_c}{M_c} \quad (\text{A.7})$$

Uma vez que o gás no interior do airbag se comporta como um gás ideal , aplicando-se a equação do gás idela à EQ.(A.7) chega-se na EQ.(A.8). Onde ρ é a densidade, M é a massa molecular do gás no interior do airbag , R é contante universal dos gases ideias, T é a temperatura e p_{atm} é a pressão atmosférica local,

$$a = g - \left(\rho \frac{RT}{M} - p_{atm} \right) \frac{S_c}{M_c} \quad (\text{A.8})$$

O modelo de airbag motorista de Zhang et all [17] tem a forma de um esferóide oblato quando está completamente cheio cujas dimensões estão indicadas na figura FIG.2.6 . A área superficial do airbag que entra em contato com a placa plana é indicada EQ. (A.9).

$$S_c = \pi \left(\frac{L}{2} \right)^2 \quad (\text{A.9})$$

Para descrever o fluxo de gás através das fronteiras do sistema à medida em que o airbag é comprimido Zhang et all [17] utilizou a equação do momento linear indicada na EQ.(A.10). A variação do momento linear de um corpo igual ao impulso da força resultante que

atua sobre ele. Onde dm_0 é a vazão mássica de gás que atravessa as fronteiras do airbag através do furo de exaustão de gás com área A num intervalo de tempo dt e h é a velocidade com que o gás atravessa as fronteiras do airbag na direção indicada pela figura FIG. 7.1

$$h dm_0 = (p - p_{atm}) A dt \quad (A.10)$$

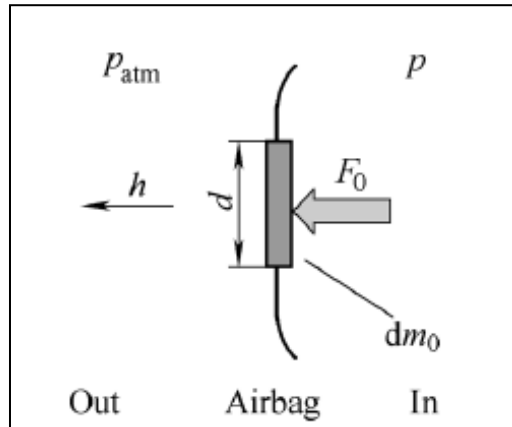


FIGURA 7.1 Esquema do fluxo de gás através para fora do airbag através do furo de exaustão circular de diâmetro d e área A .

FONTE: Junyuan et al., 2015, p4.

Partindo da equação EQ.(A.8) utilizando as equações EQ. (A.9) e EQ.(A.10), o conceito básico de densidade como sendo a razão entre a massa e o volume e aproximando o volume total da bolsa do airbag pelo volume da forma geométrica da figura FIG.2.6 Zhang et al [17] chegou na equação EQ.(A.11).

$$a = g - \frac{\pi \left(\frac{L}{2}\right)^2}{M_c} \left[\left(\frac{m(t) - 2 \int_0^t \rho A \sqrt{\frac{(p-p_{atm})}{\rho}} dt}{\pi \left(\frac{L}{2}\right)^2 X + \int_{\frac{L}{2}}^{L+X} 2\pi x \sqrt{\left(\frac{X}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{L}{2}\right)^2} dx} \right) \frac{RT}{M} - p_{atm} \right] \quad (A.11)$$

7.4 Dedução do modelo de Wen at all.

Aplicando o princípio da conservação de energia sobre o sistema de amortecimento de queda de Wen at all. chega-se na equação EQ.(A.12); onde ΔW é o trabalho que a pressão atmosférica exerce sobre o airbag, ΔQ é quantidade de energia que deixa a bolsa devido ao fluxo de gás para fora ao passo em que o airbag é comprimido, ΔU é a variação da energia interna do gás ΔE_k e ΔE_p são respectivamente as variações de energia cinética e potencia do sistema e ΔE_f é a variação da energia potencial elástica da bolsa que se dá devido ao seu esticamento.

$$\Delta W + \Delta Q = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p + \Delta E_f \quad (\text{A.12})$$

Aplicando-se os conceitos termodinâmicos de trabalho, quantidade de calor e energia interna de um gás ideal e; os conceitos de energia cinética e energia potencial da mecânica clássica os cinco primeiros termos da equação EQ.(A.12) foram determinados conforme indicado nas equações EQ.(A.13) até EQ.(A.17).

$$\Delta W = \int -P_a A \dot{z} dt \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta Q = \int C_p \dot{m} T dt \quad (\text{A.14})$$

$$\Delta U = \int_{T_0}^T C_v m(t) dT = C_v [m(t)T - m_0 T_0] \quad (\text{A.15})$$

$$\Delta E_k = M \frac{\dot{z}^2 - \dot{z}_0^2}{2} \quad (\text{A.16})$$

$$\Delta E_p = Mg(z - z_0) \quad (\text{A.17})$$

Para determinar ΔE_{el} Wen at all utilizou o conceito de trabalho da força elástica conforme indicado na EQ.(A.18); o tecido da bolsa é considerado isotrópico para que a lei de Hook Generalizada possa ser aplicada e a EQ.(A.18) se transforme na EQ.(A.19). Onde σ_h representa a

tensão circunferencial que atua em uma seção transversal do tecido, σ_t representa a tensão axial que atua ao longo do eixo do cilindro da bolsa, ε_{ij} é a deformação linear e μ é a constante de Poisson do tecido.

$$\Delta E_f = \iiint \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV_{\text{tecido}} \quad (\text{A.18})$$

$$\Delta E_f = \frac{1}{2E} \iiint (\sigma_h^2 + \sigma_t^2 - 2\mu\sigma_h\sigma_t) dV_{\text{tecido}} \quad (\text{A.19})$$

A figura FIG.7.2 ilustra a tensão circunferencial (σ_h) que atua em uma seção transversal do tecido e a tensão axial que atua ao longo do eixo do cilindro da bolsa (σ_t).

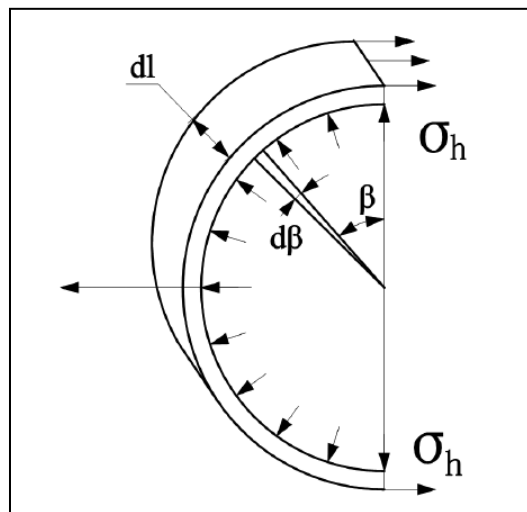


FIGURA 7.2 Ilustração da tensão circunferencial em uma seção transversal do airbag.

FONTE: Wen et al., 2010, p5.

Fazendo um balanço de forças na seção do airbag ilustrada na figura FIG.7.2 e desenvolvendo a equação do volume da bolsa baseado na forma geométrica da figura FIG.2.8 a EQ. (A.19) assume a forma da EQ.(A.20). Onde z está indicado na FIG.2.8, L_t é o comprimento horizontal do airbag cilíndrico, D é o diâmetro do cilindro horizontal, h_0 é a espessura do tecido do airbag e E é o módulo de Young do tecido.

$$\Delta E_f = \frac{\pi(P-P_a)^2}{32h_0ED^2} \left(D + L_t + Dz - \frac{z^2}{2} \right) (8D^2 + z^2 - 4Dz - 8\mu D^2 + 4\mu Dz) \quad (\text{A.20})$$

Ao substituir as equações EQ.(A.13) até EQ.(A.17) mais a EQ.(2.20) na EQ.(A.12) obtem-se a EQ. (A.21) que representa o balanço de energia geral do sistema de Wen at all [19].

$$\int -P_a A \dot{z} dt + \int C_p \dot{m} T dt = C_v [m(t)T - m_0 T_0] + M \frac{z^2 - z_0^2}{2} + Mg(z - z_0) + \frac{\pi(P-P_a)^2}{32h_0ED^2} \left(D + L_t + Dz - \frac{z^2}{2} \right) (8D^2 + z^2 - 4Dz - 8\mu D^2 + 4\mu Dz) \quad (\text{A.20})$$