



DANIEL TODESCATT

Influência do Sistema Pré-Crash de Segurança Veicular em Ocupantes de Diferentes Estaturas

44/2014

CAMPINAS
2014



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DANIEL TODESCATT

Influência do Sistema Pré-Crash de Segurança Veicular em Ocupantes de Diferentes Estaturas

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca da Arruda

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO DANIEL TODESCATT E ORIENTADA PELO
PROF. DR. ANTÔNIO CELSO FONSECA DE ARRUDA

ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2014**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

T567i Todescatt, Daniel, 1973-
Influência do sistema pré-crash de segurança veicular em ocupantes de diferentes estaturas / Daniel Todescatt. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Antonio Celso Fonseca de Arruda.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Automóveis - Equipamento e acessórios. 2. Veículos autônomos. 3. Automóveis - Danos de colisão. 4. Indústria automobilística - Medidas de segurança. I. Arruda, Antonio Celso Fonseca de, 1948-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Influence of vehicle pre-crash safety system in occupants of different sizes

Palavras-chave em inglês:

Automobiles - Equipment and accessories

Autonomous vehicles

Automobiles - Collision damage

Automotive industry - Safety measures

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Antonio Celso Fonseca de Arruda [Orientador]

Paulo Roberto Gardel Kurka

Ademar de Azevedo Cardoso

Data de defesa: 10-03-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

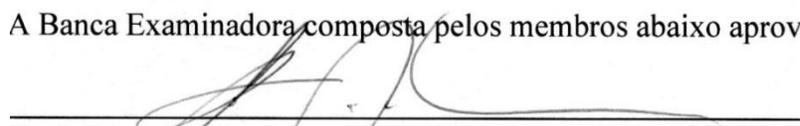
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Influência do Sistema Pre-Crash de Segurança
Veicular em Ocupantes de Diferentes Estaturas**

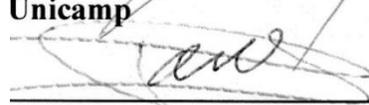
Autor: Daniel Todescatt

Orientador: Antonio Celso Fonseca de Arruda

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda, Presidente
Unicamp**



**Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka
Unicamp**



**Prof. Dr. Ademãr de Azevedo Cardoso
FAAP**

Campinas, 10 de Março de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Luciane e meus filhos Pedro Henrique e Maria Fernanda, que são o objetivo final em cada passo que dou em minha vida e a meus pais, Osvaldo e Margarida, que sempre estiveram presentes na minha formação pessoal e profissional e cujo espírito de respeito e persistência me auxiliaram de maneira fundamental na elaboração deste trabalho.

Finalmente dedico a Deus, pois vem Dele tudo o de mais valioso que possuo e para o qual existo: minha família.

AGRADECIMENTOS

A meu orientador Professor Antônio Celso Fonseca de Arruda, que pela sua paciência nestes anos de contato e sua preocupação real com a segurança veicular no Brasil, o que motivou bastante na execução deste trabalho.

A meu superior e companheiro já há anos na Volkswagen do Brasil Leandro Macedo, que me auxiliou com conselhos e informações na execução deste trabalho.

Ao colega e companheiro na Volkswagen do Brasil, Alberto Akiossi pela ajuda no contato com o meu orientador e pelo auxílio na elaboração das ideias para a elaboração deste trabalho.

A meu colega e amigo Luciano Blinder, que com paciência e humildade me ensinou muito do que apliquei neste trabalho.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação da Unicamp, pelo atendimento prestativo em todos os momentos.

Finalmente a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram no processo de construção desta dissertação.

Especialmente à minha família pelo apoio e compreensão pelos períodos nos quais estive ausente do seu convívio.

RESUMO

Esta dissertação visa comparar o desempenho de um sistema convencional de proteção de ocupantes (sistema de retenção) em um veículo de passeio com um sistema pré-crash, considerando ocupantes de três tamanhos diferentes. O termo pré-crash significa que pode ocorrer o disparo do *air-bag* e pré-tensionador antes do instante de impacto enquanto que no sistema convencional o disparo ocorre sempre após o impacto.

Com esta finalidade foi utilizado um modelo de simulação desenvolvido no programa 'Madymo' combinado ao programa de otimização multidisciplinar 'Mode-Frontier'. Este modelo corresponde à parte do veículo que envolve o motorista e é constituído por parte da carroçaria, assento, coluna de direção e o sistema de retenção. Todo o modelo está sujeito a uma curva de aceleração que representa um impacto frontal contra uma barreira rígida a 50 km/h. São utilizados três tamanhos padronizados de ocupantes representados por bonecos (*dummies*) que possuem sensores em certas partes do corpo com a finalidade de identificar os índices biomecânicos resultantes do impacto. Estes índices biomecânicos identificam o nível de carga sobre estas partes do corpo e podem ser comparados com critérios estabelecidos em norma. Os três tamanhos de ocupante são definidos da seguinte forma: 5%, 50% e 95%. Onde 5% representa a parcela de 5% da população de menor estatura, 50% representa uma estatura equivalente à média da população e 95% a estatura que é maior que 95% da população. Este padrão é definido de acordo com o tamanho da população americana da época em que estes *dummies* foram desenvolvidos.

O trabalho é dividido em três etapas. Na primeira é utilizado o programa de otimização para dimensionar um sistema de retenção que seja ideal para o 'dummy' tamanho 50%. A partir dos parâmetros determinados para o sistema de retenção são avaliados e comparados os índices biomecânicos dos ocupantes de tamanhos 5% e 95%. O objetivo é demonstrar os riscos a que os ocupantes de dimensões fora do tamanho 50% estão sujeitos.

Posteriormente são encontrados, também por meio de algoritmo de otimização, os parâmetros do sistema de retenção que são ideais para os ocupantes 5% e 95%. Novamente é feita uma comparação dos resultados.

Por fim é feito um procedimento similar considerando a possibilidade de adiantamento no disparo de dois dispositivos do sistema de retenção: *air-bag* e pré-tensionador. Novamente é

utilizado o algoritmo de otimização para encontrar os parâmetros ideais do sistema de retenção para o ocupante de estatura 50%. Neste caso pode-se verificar se ocorre a melhora dos índices biomecânicos para o ocupante de tamanho 50% comparando-se com os resultados obtidos em um sistema de retenção convencional. Porém, neste caso, o aspecto mais importante deste trabalho é verificar se o adiantamento no tempo de disparo possibilita de redução do risco de ferimentos também para os ocupantes com dimensões 5% e 95% mesmo utilizando-se um sistema de retenção dimensionado para o ocupante de tamanho 50%.

Palavras-Chave: automoveis - equipamento e acessórios, veiculos autônomos, automoveis - danos de colisão, industria automobilistica - medidas de segurança.

ABSTRACT

This dissertation aims to compare the performance of a conventional occupants protection system in a passenger vehicle with the performance of a pre-crash system, considering occupants of three different sizes. The term pre-crash means that the firing of the airbag and pretensioner may occur before the instant of impact, while in the conventional system the trigger always occurs after impact.

With this purpose a simulation model was developed in the software 'MADYMO' combined with the multidisciplinary optimization software 'Mode-Frontier'. The frontal region of the passengers compartment, the seat, the steering column and the restraint system are modelled. The whole model is subject to an acceleration curve that represents a frontal impact against a rigid barrier at 50 km/h. Three standard occupant sizes represented by dummies are used. They have sensors in certain parts of the body with the purpose of identifying the biomechanical results from an impact. The level of biomechanical loads on parts of the body can be compared with the criteria established in the regulations. The three sizes of occupant are defined as follows: 5%, 50% and 95%. Where 5% is the share of 5% of the population with smaller stature, 50% represents a height equivalent to the average of the population and 95% height that is greater than 95% of the population. The default size is set according to the size of the U.S. population at the time that these dummies were developed.

The work is divided into three stages. The first uses an optimization program to obtain a restraint system that is ideal for the dummy size 50%. From the parameters determined for the restraint system the biomechanical indices of occupant sizes 5% and 95% are evaluated and compared. The purpose is to demonstrate the risks to which occupants of dimensions out of size 50% are subject.

In the second stage the parameters of the restraint system which are ideal for the sizes 5% and 95% are found, also by means of the numerical optimization algorithm. A comparison of the results for the dummy 5% with parameters for 5 and 50% is made. Also a comparison of the results for the dummy 95% with parameters for 95 and 50% is made.

Finally, in the third stage, a similar procedure is done considering the advance in the firing time of two devices from the restraint system: air-bag and pretensioner. Again the optimization

algorithm is used to find the optimal parameters for the restraint system considering the occupant height 50%. In this case it is checked whether there are improvements of biomechanical indexes for the occupant size 50%, comparing with the results obtained in a conventional restraint system. Here we reach the most important aspect of this work, which is checking if the advance in firing time results in a reduction of the risk of injury also for occupants with dimensions 5% and 95%, even using a retention system sized for the occupant size 50%.

Key Words: automobiles-equipment and accessories, autonomous vehicles, automobiles-collision damage, automotive industry-safety measures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 Segurança passiva, sequência de eventos.....	6
Figura 2.1 Barreira rígida 100% (esq.). Barreira deformável 40% dir. (CARHS 2010).....	8
Figura 2.2 Modelo de simulação do MADYMO com os ocupantes 5%,50% e 95%.	9
Figura 2.3 Curva de Mc Millan para o pulso de crash frontal: em vermelho corresponde à curva de aceleração experimental e em azul a aproximação pela curva de Mc Millan.....	10
Figura 2.4 Componentes presentes no modelo de elementos finitos.....	11
Figura 2.5 Organograma do processo de otimização.	17
Figura 2.6 Etapa 1: sistema de retenção dimensionado para o dummy 50%, comparação dos índices para os três tamanhos de dummies.	17
Figura 2.7 Etapa 2 – dimensionamento do sistema de retenção individualmente para cada tamanho de ocupante (adaptativo).	18
Figura 2.8 Etapa 3: comparação dos resultados utilizando <i>pre-crash</i>	18
Figura 3.1 Disposição da trama do cinto de segurança (MORELO, 2011).....	21
Figura 3.2 Exemplos de configurações de cinto de segurança (KRAMER, 2006).	22
Figura 3.3 Exemplo de disposição do pré-tensionador no retrator do cinto.....	23
Figura 3.4 Exemplo de pré-tensionador no terminal do cinto. Depois do acionamento do gerador de gás a pressão no interior do cilindro aumenta (1). O pistão se desloca (2) puxando o terminal do cinto para baixo através de um cabo (3) (SCHINDLER, 2008).....	23
Figura 3.5 Comparativo da aceleração do ocupante no interior do veículo sem o uso do cinto de segurança (esq.) e com o uso do cinto de segurança mais pré-tensionador e limitador de carga (dir.) (KRAMER, 2006).	24
Figura 3.6 Exemplo de ação do limitador de carga na redução de aceleração do tórax (KRAMER, 2006).....	25
Figura 3.7 Exemplo de retrator para o cinto de segurança (SCHINDLER, 2008).....	26
Figura 3.8 Disposição do cinto de três pontos com os demais componentes acoplados (SCHINDLER, 2008)	26
Figura 3.9 Disposição das bolsas infláveis no caso do <i>air-bag</i> de ação frontal (KRAMER, 2006)..	27

Figura 3.10 Exemplo do dispositivo de geração de gás do <i>air-bag</i> (KRAMER, 2006).....	28
Figura 3.11 Exemplo típico do processo de disparo de um <i>air-bag</i> do motorista ao longo do tempo (KRAMER, 2006).....	29
Figura 3.12 Movimentação do ocupante em um teste com barreira rígida a 55 km/h (KRAMER, 2006).....	30
Figura 3.13 Exemplo de assento dianteiro com encosto de cabeça.....	31
Figura 3.14 Coluna de direção com sistema de desarme.....	31
Figura 3.15 Exemplo da montagem de um sistema de corpos.	33
Figura 3.16 Exemplo da montagem de um sistema de corpos.	34
Figura 3.17 Exemplo de processo de crossover.	42
Figura 3.18 Exemplo de mutação em descendente.....	42
Figura 3.19 Processo de otimização utilizando algoritmo genético.	43
Gráfico 4.1– Resultados Biomecânicos (porcentual relativo ao tamanho 50%)	47
Gráfico 4.2– Resultados Biomecânicos (porcentual relativo ao tamanho 50%)	50
Gráfico 4.3– Resultados Biomecânicos (% em relação ao 50%)	53
Figura 4.4 Comparativo pré-crash x método convencional em segurança passiva.	55
Gráfico 4.5– Comparativo para resultados do fêmur.	56
Gráfico 4.6– Comparativo para resultados da cabeça.	57
Gráfico 4.7 – Comparativo para resultados do pescoço.	58
Gráfico 4.8– Comparativo para resultados do tórax.....	59
Gráfico 4.9 – Resumo dos resultados para o <i>dummy</i> 5%.	60
Gráfico 4.10 – Resumo dos resultados para o <i>dummy</i> 95%.	61
Gráfico 4.11 – Resumo dos resultados para o <i>dummy</i> 50%.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Intervalo das variáveis de entrada do sistema.....	13
Tabela 2.2 Pesos dos índices biomecânicos.	16
Tabela 4.1 Resultados dos índices biomecânicos para um sistema de retenção dimensionado para o ocupante de estatura 50%.....	46
Tabela 4.2 Parâmetros do Sistema de retenção otimizados para o <i>dummy</i> 50%	48
Tabela 4.3 Valores dos índices com os parâmetros do sistema de retenção otimizados individualmente.....	49
Tabela 4.4 Melhora nos resultados Biomecânicos para sistema dimensionado individualmente.	50
Tabela 4.5 Valores do sistema de retenção otimizado para cada tamanho de ocupante.	51
Tabela 4.6 Resultados dos índices biomecânicos encontrados com offset no tempo de impacto.	53
Tabela 4.7 Melhora dos índices com sistema de retenção otimizado para estatura de 50%	54
Tabela 4.8 Parâmetros do sistema para <i>pre-crash</i>	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Latinas

A_v	Área do furo do <i>air-bag</i>	[mm ²]
A_{eff}	Área efetiva do furo	[mm ²]
c	Velocidade do som no material	[mm/ms]
CD_{ex}	Coefficiente de área efetiva	
CD_p	Coefficiente de expansão do tecido do <i>air-bag</i>	
CD_p	Coefficiente de escape dos gases em função do tempo	
$D(t)$	Deslocamento da costela no tempo	[mm]
E	Módulo de elasticidade do material	[GPa]
F_z	Força no ponto de transição da cabeça para o pescoço	[kN]
F_{zc}	Força limite no pescoço	[kN]
F_{obj}	Função objetivo	
L	Comprimento característico do elemento	[mm]
\dot{m}	Vazão de massa do gás	[kg/ms]
M_y	Momento total no pescoço.	[kN.mm]
M_{yc}	Momento limite no pescoço	[kN.mm]
$R(t)$	aceleração resultante na cabeça.	[g]
SZ	Constante do <i>dummy</i> : metade da largura da caixa torácica.	[mm]

.....

Letras Gregas

β	Fator de forma o fator de ajuste da amplitude	
λ	Fator peso da função objetivo	
ρ	Densidade do material	[kg/mm ³]
Δt	Intervalo de Tempo	[ms]
ω	Autovalor da malha de elementos finitos	

Letras Gregas

ω_i - Velocidade angular



Siglas

ABS	Anti Block System
EBD	Electronic Brake Distribution
ESP	Electronic Stability Program
HHH	Dummy Hibrid III
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DOE	Design of Experiments
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
FMVSS	Federal Motor Vehicle Standarts and Regulation
HIC	Head Injury Criteria
VC	Viscous Criteria
NIJ	Neck Injury Predictor
FFC	Femur Criteria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos.....	4
2	MATERIAIS E MÉTODOS	7
2.1	Elaboração e Condições do Teste	7
2.2	Modelos de Simulação MADYMO	8
2.3	Índices Biomecânicos	11
2.4	Processo de Geração dos Resultados.....	12
2.4.1	Sequência de Solução – Processo de Otimização.....	12
2.4.2	Variáveis de Entrada.....	12
2.4.3	Air-bag.....	13
2.4.4	Retrator.....	14
2.4.5	Coluna de Direção.....	14
2.4.6	População Inicial.....	15
2.4.7	Otimização Através de Algoritmo genético.....	15
2.4.8	Pesos dos Índices Biomecânicos.....	15
2.4.9	Solução Ótima.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	Índices Biomecânicos	19
3.2	Sistema de Retenção	21
3.3	Modelo de Simulação no MADYMO e Condições de Contorno	31

3.3.1	Conceito de Multicorpos.....	32
2.3.2	Inércia de Corpos Rígidos e Posição de Juntas.....	33
3.3.3	Cinemática de Corpo Rígido.....	34
3.4	Método dos Elementos Finitos	35
3.4.1	Modelo de Air-bag.....	38
3.5	Conceitos de Otimização e <i>Design of Experiments</i> (DOE).....	39
3.5.1	Algoritmo Genético.....	40
3.5.2	População Inicial.....	44
3.5.3	Análise de Sensibilidade.....	44
3.5.4	Método das Preferências.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Dimensionando o Sistema de Retenção para o <i>Dummy</i> 50%	46
4.2	Dimensionamento do sistema de retenção para cada tamanho de ocupante	48
4.3	Pré-Crash - Offset no tempo de disparo de até 30 ms antes do impacto	52
4.4	Comparativo Por Índice	55
5	CONCLUSÕES	63
6	REFERÊNCIAS.....	66
	ANEXO A – PESOS PARA OS ÍNDICES BIOMECÂNICOS.....	70
	ANEXO B – ÍNDICE DE ACIDENTES E ÁREAS AFETADAS DOS OCUPANTES.....	71
	ANEXO C – EXEMPLO SEGURANÇA ATIVA	72
	ANEXO D – DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES BIOMECÂNICOS RELEVANTES.....	73
	ANEXO E –TOLERÂNCIA PARA CABEÇA: NÍVEL DE ACELERAÇÃO/DURAÇÃO	74
	ANEXO F – CARGAS NO PESCOÇO E CRITÉRIO FMVSS 208.....	75
	ANEXO G - CURVA DE TOLERÂNCIA PARA O TÓRAX.....	76

ANEXO H – APROXIMAÇÃO PELA CURVA DE MCMILLIAN	77
ANEXO I – DIAGRAMA VELOCIDADE/TEMPO NO IMPACTO	78
ANEXO J – DUMMY HIII 50%	79
ANEXO K – SLED-TEST	80
ANEXO L – REGIÕES DO CORPO AFETADAS EM IMPACTO FRONTAL.....	81
ANEXO M – DISPARO DO AIR-BAG COM E SEM PRE-CRASH	82
ANEXO N – CRITÉRIOS PARA ÍNDICES BIOMECÂNICOS FMVSS208	83
ANEXO O – GRAU DE FERIMENTOS E FREQUÊNCIA EM ACIDENTES	84
ANEXO P – RISCO DE FERIMENTOS DE ACORDO COM TAMANHO E PESO DOS OCUPANTES.....	85
ANEXO Q – ALTURA E PESO DOS DUMMIES.....	86
APÊNDICE A – DIAGRAMA DE OTIMIZAÇÃO NO MODEFRONTIER	87

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística é continuamente impelida a melhorar a segurança dos veículos que são introduzidos nos mercados mundiais todos os anos. A melhora destes requisitos é justificada pelas regras de segurança dos países onde seus veículos estão presentes, órgãos independentes de avaliação de segurança, competitividade, ações de marketing e introdução de critérios internos de segurança mais rígidos.

Esta melhoria contínua é evidenciada pela introdução de itens de segurança ativa e passiva, dentre os quais os mais conhecidos são o ABS e *air-bag*. Outros itens de segurança menos citados, e que estão presentes nos carros atuais são o pré-tensionador, coluna de direção desarmável, EBD, limitador de carga, ESP etc. A estrutura dos veículos também evoluiu consideravelmente, otimizando a deformação em caso de impacto, de modo a preservar o habitáculo ao mesmo tempo em a estrutura absorve o máximo de energia.

Porém novos desafios surgem à medida que aspectos legais, culturais, ambientais e fisiológicos se transformam com o avanço dos anos. Veículos que possuem células de energia são hoje um grande desafio em termos de volume e disposição das baterias para que se mantenha o mesmo desempenho da estrutura nos diversos casos de testes previstos em legislação. Diversos países do mundo estão rapidamente introduzindo regras mais rígidas onde os compromissos de uma estrutura mais segura e ao mesmo tempo mais leve (menor consumo de combustível) devem coexistir. Com relação aos aspectos fisiológicos, é importante considerar que na maioria dos países o envelhecimento populacional devido ao aumento da expectativa de vida leva cada vez mais motoristas de idade mais avançada para as ruas. Estes motoristas, devido aos aspectos do envelhecimento dos tecidos, são mais suscetíveis a ferimentos para um mesmo tipo de acidente que motoristas jovens. Por fim, um fator importante é a diversidade de estaturas existente em todos os países. Cada estatura corresponde a uma disposição específica do ocupante em relação aos elementos do interior do veículo. Hoje a maioria dos carros possui regulagem apenas do banco do motorista na direção longitudinal. Uma porcentagem menor de veículos mais caros possui opções de regulagem adicionais como altura e profundidade do volante, posição do desviador do cinto de segurança e altura do assento. Uma parcela menor ainda possui *air-bag* e pré-tensionador do cinto.

A busca pela segurança dos usuários de veículos é fundamental para a redução contínua das mortes e ferimentos que ocorrem no trânsito em todos os países do mundo. O surgimento constante de novas tecnologias para o desenvolvimento e aplicação de veículos mais seguros nas ruas e estradas, bem como a evolução da legislação e fiscalização faz com que a proporção de vítimas caia consideravelmente.

Este trabalho tem o objetivo de melhorar a segurança de uma parcela maior da população através do uso de tecnologias já disponíveis em muitos veículos combinado com novas tecnologias que estão surgindo. Este trabalho complementa os estudos realizados com as mesmas motivações por diversos fabricantes de automóveis como Delphi (Hahn, 2007), Ford (Eisenach, 2007), Volkswagen (Wohllebe, 2006) e Daimler Benz (Merz, 2007).

O enfoque principal será o estudo do efeito de diferentes medidas antropométricas no caso de um impacto frontal em obstáculo rígido. A ideia é mostrar quais são os efeitos para diferentes medidas antropométricas e avaliar como as novas tecnologias podem ajudar a minimizar estas diferenças, buscando um desempenho dos sistemas de segurança passiva que seja ideal para pessoas de diversas estaturas e pesos.

Nos itens seguintes, dentro deste capítulo, são apresentados a motivação para o trabalho e os objetivos principais para seu desenvolvimento.

A evolução do trabalho segue nos capítulos seguintes. A primeira etapa, no capítulo 2, consiste na descrição dos materiais utilizados bem como a metodologia para o desenvolvimento. São apresentados o tipo de teste utilizado, uma descrição breve do modelo de simulação utilizado e a sequência de solução. No capítulo 3 é feita uma explanação teórica dos conceitos utilizados no trabalho. Neste caso, vale ressaltar que a teoria apresentada é adequada ao entendimento e desenvolvimento do trabalho. Qualquer consulta mais profunda deve ser feita a partir da referência bibliográfica. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos em detalhe bem como as discussões e interpretações dos mesmos. Por fim no capítulo 5 é feita a conclusão do trabalho, bem como sugestão de possíveis trabalhos futuros.

1.1 Motivação

O sistema de retenção em um veículo é constituído por todos os componentes que tem a função de garantir a segurança dos ocupantes no momento em que ocorre o acidente. Exemplos destes componentes são o cinto de segurança, assento e *air-bag*. Basicamente, no desenvolvimento de veículos de pequeno porte, o sistema de retenção é dimensionado e testado utilizando *dummies*. Um *dummy* é um boneco que representa completa ou parcialmente a forma humana, possuindo diversos sensores que permitem relacionar o grau de severidade do carregamento que sofre em testes de impacto com possíveis ferimentos em seres humanos (índices biomecânicos). Os valores dos índices biomecânicos considerados e exigidos pela legislação em vários países para avaliação em testes baseiam-se, na sua maioria, em uma estatura intermediária como o *dummy* HIII 50% [ver anexo J] em crash frontal (com exceção de alguns testes específicos de ancoragem dos bancos e de cadeiras infantis). Porém, nos últimos anos o perfil dimensional das populações tem se modificado em todo o mundo. Em todos os países tem se observado o aumento de estatura e peso das populações, resultante da contínua melhora da qualidade de vida e nutrição. Isto tem implicações importantes no desempenho dos sistemas de retenção atuais, pois pessoas de estaturas diferentes daquela para a qual o sistema de retenção foi dimensionado têm grandes chances de se encontrar em uma condição pior de proteção no caso de acidente.

Atualmente existem sistemas adaptativos que, através de sensores nos assentos e em outros pontos do interior do veículo, podem identificar a condição dos ocupantes, como peso e altura (Gonter, 2007). Este sistema já encontra alguma difusão em veículos mais caros, mas tem algumas limitações como complexidade para identificar a altura e idade dos ocupantes, limitando-se apenas à identificação do peso através de sensores nos assentos.

Outra possibilidade seria a implantação de sistemas que identificam o impacto antes mesmo que este ocorra. Estes sistemas são denominados *pre-crash*, e realizam o acionamento do sistema de retenção quando identificam que um impacto é iminente e inevitável. Podem ser acionados o *air-bag*, pré-tensionador, e o sistema de freios ABS diretamente pelo módulo, independentemente da condição do ocupante.

Existem estudos desenvolvidos por montadoras (Whollebe, 2006) e por institutos independentes (Hahn, 2007) que comprovam uma maior eficiência em veículos que utilizam este sistema. Se existe uma melhora para a condição do *dummy* HIII é provável que haja melhora também para os ocupantes de outras estaturas. Se isso realmente acontecer, mesmo com desempenho menor em relação ao *dummy* HIII 50%, existe uma chance de redução da condição atual de risco para indivíduos de todas as estaturas.

1.2 Objetivos

Este trabalho é desenvolvido baseado em dois objetivos principais. O primeiro corresponde a identificar as diferenças de desempenho e riscos para ocupantes de menor e maior estatura (neste caso, posicionados no banco do motorista) em veículos cujo sistema de retenção foi dimensionado apenas para o ocupante de estatura intermediária e comparar estes resultados quando o sistema de retenção é dimensionado para cada uma das estaturas individualmente (adaptativo). Entende-se o sistema de retenção a combinação de sistemas responsáveis pela proteção do ocupante durante um acidente automobilístico. Basicamente os elementos de um sistema de retenção são o cinto de segurança, *air-bag*, pré-tensionador, coluna de direção (neste caso desarmável) e banco. Outros sistemas podem ser incorporados, porém não estão no escopo deste trabalho.

O segundo objetivo é avaliar qual a nova condição dos ocupantes em um acidente quando se utiliza um sistema que permita o disparo do *air-bag* e pré-tensionador antes da ocorrência do impacto. Basicamente, o sistema identifica através de sensores e algoritmos se o impacto é inevitável e com qual velocidade (intensidade) ele ocorrerá. Neste caso é dimensionado um sistema de retenção para o ocupante de estatura intermediária e é feita novamente a comparação de desempenho com os ocupantes de maior e menor estatura. Verifica-se então se houve melhora no desempenho para as diferentes estaturas além da estatura intermediária.

Esta análise acontece através de uma ferramenta computacional para simular o desempenho de três diferentes tamanhos antropométricos correspondentes à faixa de 5% da população de menor estatura, 50%, correspondendo a uma estatura intermediária e 95%, que corresponde a

uma estatura maior que a estatura de 95% da população. Para isto é utilizado um modelo já desenvolvido no programa MADYMO ©TNO, constituído por parte da carroceria de um veículo de pequeno porte, motorista e sistema de retenção. O modelo de simulação utilizado é uma versão do modelo apresentado no *paper* SAE 210 36 020-P (Morassi, 2010). Sendo submetido a uma curva de aceleração que representa o efeito de um crash frontal (parede rígida) a 50 km/h. Este crash frontal no qual o teste é aplicado está conforme norma ABNT NBR 15300-1 (2005). O ensaio é também denominado *sled-test* (Morassi, 2010), onde uma carroceria é colocada sobre um veículo rígido (*Panzer*), que impacta contra um anteparo deformável, gerando acelerações equivalentes a um teste com veículo completo sem destruir ou deformar a carroceria. Este tipo de acidente foi escolhido por apresentar maior porcentual de mortos e feridos (Morassi, 2010), portanto com maior demanda por melhoria. Com o modelo descrito pode-se clarificar as etapas para atingir os objetivos do projeto:

- A) Encontrar a melhor configuração do sistema de retenção para cada um dos três tamanhos de ocupantes. No caso dos resultados do *dummy* 50%, os parâmetros do sistema de retenção encontrados serão assumidos como sendo o dimensionamento de um sistema de retenção para um veículo convencional e são utilizados nas simulações com os outros dois tamanhos de ocupantes. Por fim os índices biomecânicos serão comparados para as três estaturas. Identificar, para os resultados obtidos, qual a correlação de cada componente do sistema de retenção com cada resultado biomecânico. Isto permite verificar se determinado componente do sistema de retenção possui uma relação direta, inversa ou nula em cada resultado biomecânico.
- B) Encontrar a melhor configuração do sistema de retenção para cada um dos outros dois tamanhos de ocupante. Novamente os índices são comparados e é verificado se houve melhora no desempenho dos ocupantes de estatura 5% e 95%. Neste caso assume-se o modelo como sendo um sistema que se adapta à condição do ocupante em termos de estatura e peso (adaptativo).
- C) Avaliar o efeito do uso de sistemas pré-crash em cada um dos ocupantes, identificar suas vantagens e desvantagens e comparar estes resultados com os resultados de um sistema de retenção convencional e de um sistema de retenção adaptativo.

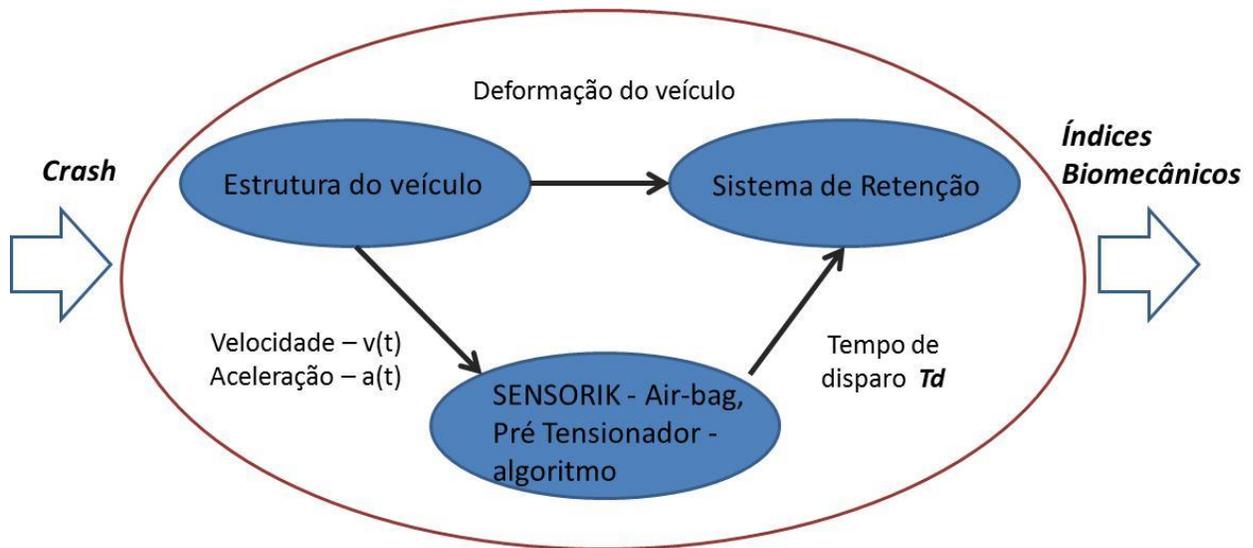


Figura 1.1 Segurança passiva, sequência de eventos.

Resumindo, o objetivo principal é determinar as variações dos índices biomecânicos existentes entre as diferentes medidas antropométricas e avaliar potenciais de melhorias nos mesmos a partir de uma nova condição do sistema de retenção que pode ser um sistema adaptativo ou pré-crash (antecipação do tempo de disparo do *air-bag* e pré-tensionador). Avaliar também o potencial de ganho na combinação dos sistema adaptativo e *pre-crash*. Não faz parte do escopo do trabalho dimensionar um sistema de retenção em si.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão as ferramentas e metodologias utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente são apresentadas as normas e características do tipo de teste escolhido. Na sequência é descrito o modelo de simulação utilizado, onde para o mesmo veículo, são feitas análises para três diferentes estaturas de ocupantes. A curva de aceleração, que representa o tipo de impacto escolhido, foi utilizada como referência em todas as simulações.

A seguir são apresentados os índices biomecânicos medidos nos *dummies* e os componentes do sistema de retenção que são relevantes para o trabalho. Por fim é feita uma breve descrição do processo de otimização, apresentando o algoritmo utilizado e a representação esquemática dos processos para obtenção dos resultados. Maiores detalhes de cada tema tratado neste capítulo podem ser consultados no capítulo 3.

Inicialmente a simulação encontrará, através do método de otimização, uma configuração do sistema de retenção que seja ideal para o ocupante de estatura intermediária (*dummy 50%*). De posse destes valores será avaliado o desempenho dos ocupantes de estatura 5% e 95%, comparando-se os resultados com o de estatura 50%.

Na sequência encontra-se uma configuração do sistema de retenção que seja ideal para cada um dos três tamanhos. Novamente os resultados são comparados.

Por fim, é feito o adiantamento do disparo do sistema pré-tensionado/*air-bag*, ou seja o seu disparo pode ocorrer antes do impacto. Novamente é feito o dimensionamento do sistema de retenção para o ocupante de estatura 50%. Nesta nova condição são realizadas as simulações dos ocupantes de estatura 5% e 95%. Os resultados são comparados entre si e com aqueles obtidos nas duas etapas anteriores.

2.1 Elaboração e Condições do Teste

O teste para aprovação do veículo segue resolução do CONTRAN 221 07/[1], que trata da proteção de ocupantes na condição de impacto frontal. Esta resolução referencia a norma

americana da *Federal Motor Vehicle Standards and Regulation FMVSS 208 (Occupant Crash Protection)*. O teste ocorre em duas etapas:

- Impacto em barreira rígida a 48 km/h e sobreposição de 100 %.
- Impacto em barreira deformável a 56 km/h e sobreposição de 40%.

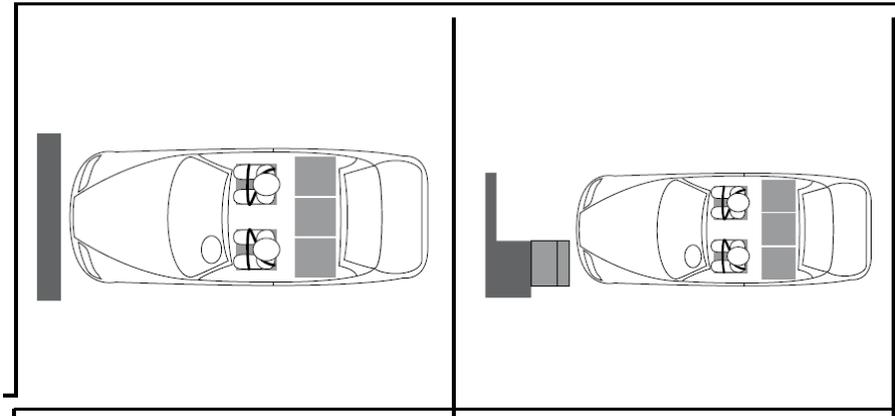


Figura 2.1 Barreira rígida 100% (esq.). Barreira deformável 40% dir. (CARHS 2010).

O teste é realizado com *dummies* 50% onde os critérios são a integridade estrutural do carro e os índices biomecânicos medidos. O fabricante do veículo pode escolher uma das etapas para a validação do veículo. No âmbito deste trabalho será utilizado o teste com barreira rígida que permite a aplicação em um *sled-test* que reproduza a mesma condição de aceleração de um teste real com veículo deformável (Morassi, 2010). A vantagem principal neste caso é a redução considerável do tempo de processamento das simulações no durante o processo de otimização.

2.2 Modelos de Simulação MADYMO

O programa utilizado para a simulação da condição do teste é o MADYMO ©TNO Automotive. No MADYMO ©TNO são utilizados três modelos de simulação, todos com a mesma carroçaria, mas com um ocupante de estatura diferente: 5%, 50% e 95%.

Os modelos de simulação dos *dummies* são certificados pela TNO e são calibrados de acordo testes experimentais realizados pelo fabricante (Madymo V5.4, 1999). O modelo do

veículo é representado pelas dimensões um veículo genérico de pequeno porte classe A0 (Gol, Palio, Clio etc.).

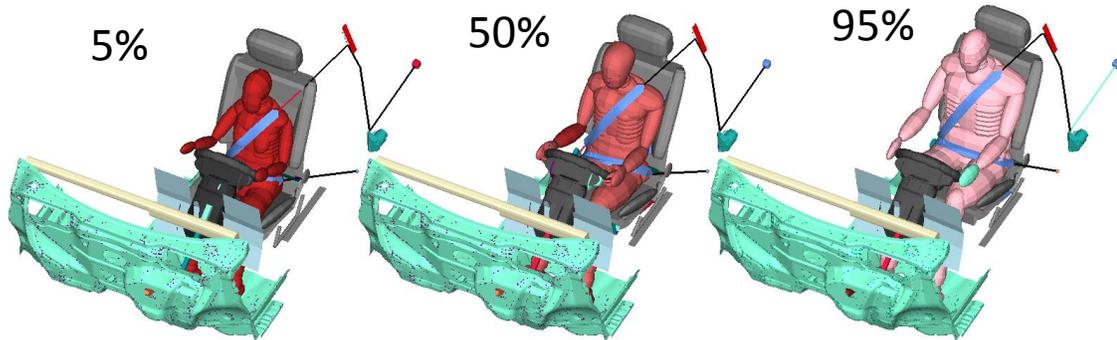


Figura 2.2 Modelo de simulação do MADYMO com os ocupantes 5%,50% e 95%.

Os três modelos são submetidos à mesma curva de aceleração que representa o *sled-test* frontal. Os mesmos estão posicionados de acordo com a sua estatura: assento todo à frente para o *dummy* 5%, na posição intermediária para o *dummy* 50% e totalmente recuado para o *dummy* 95%. A curva de aceleração foi obtida a partir de uma curva de aceleração experimental de um veículo de classe A0 e aproximada a partir da fórmula de Mc Millan:

$$a(t) = C \frac{t}{t_2} \left(1 - \frac{t}{t_2} \right)^\beta \quad \text{equação 2.1}$$

Onde: β é o fator de forma o fator de ajuste da amplitude.

C constante da curva

t_2 momento de inversão do sinal de aceleração.

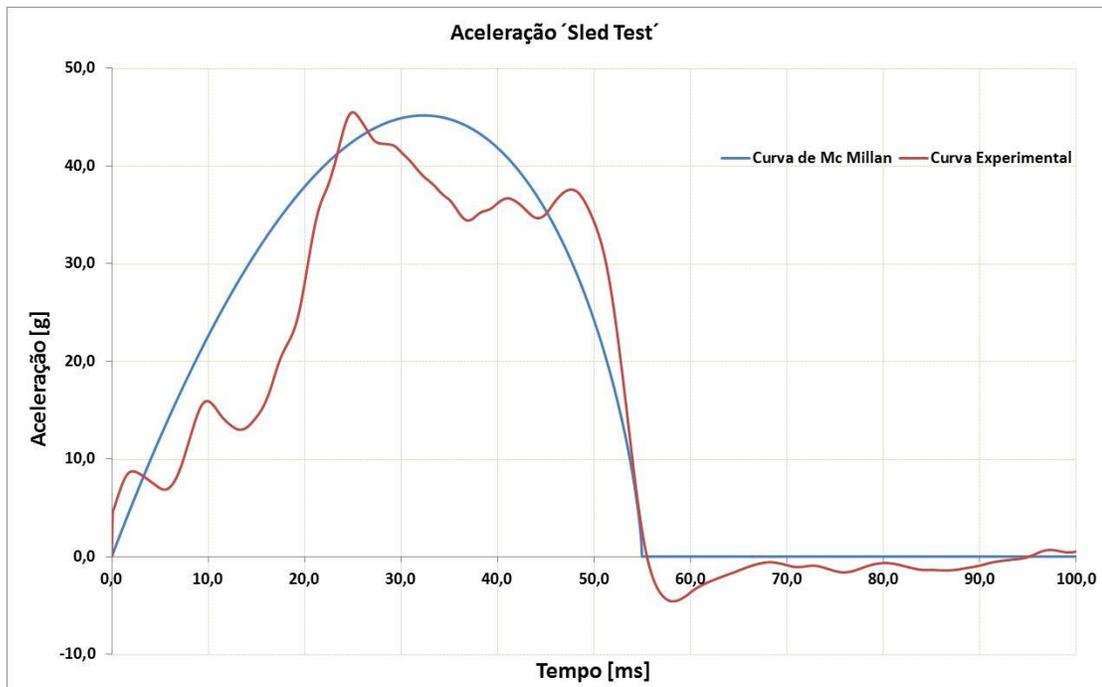


Figura 2.3 Curva de Mc Millan para o pulso de crash frontal: em vermelho corresponde à curva de aceleração experimental e em azul a aproximação pela curva de Mc Millan

No modelo do veículo a estrutura do carro está representada pelo assoalho dianteiro e pela armação do painel conforme figura 2.4. Os elementos do sistema de retenção que estão representados no modelo são:

- Cinto de segurança
- Pré-tensionador
- Limitador de Carga
- Retrator
- Air-Bag
- Banco do motorista
- Coluna de direção desarmável

A descrição de cada um destes componentes, bem como de seu funcionamento está presente no capítulo 3.2.

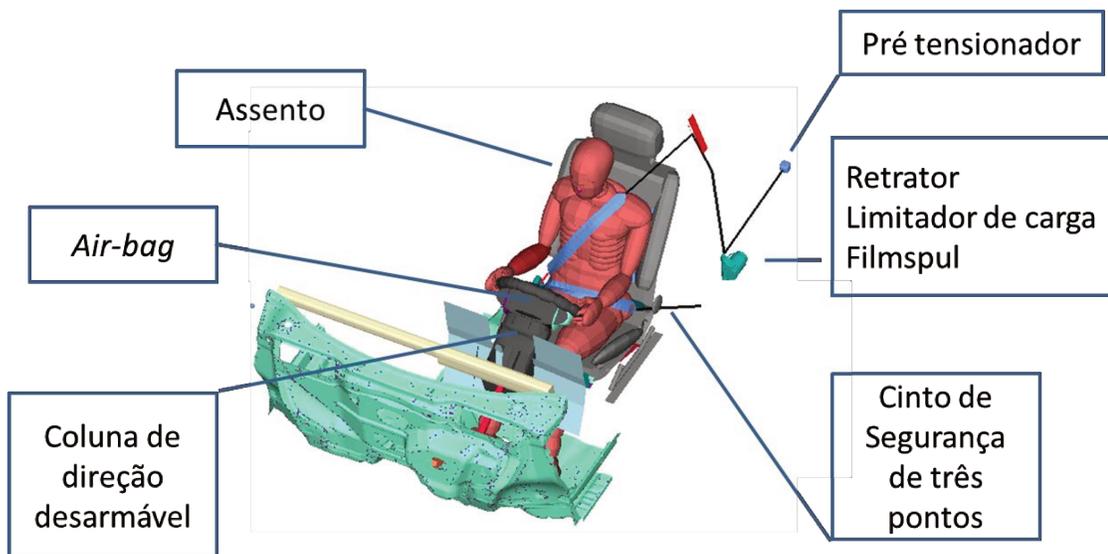


Figura 2.4 Componentes presentes no modelo de elementos finitos.

2.3 Índices Biomecânicos

Os índices biomecânicos exigidos pela norma FMVSS208 obtidos a partir da simulação são:

HIC (*head injury criteria*) – critério relacionado ao grau de ferimento da cabeça.

VC (*viscous criteria*) – avalia o risco de ferimento no tórax.

NIJ (*neck injury predictor*) – risco para o pescoço em flexão e tração.

FFC (*fêmur criteria*) – risco para o fêmur.

Os valores de força compressão na tíbia (kN) exigidos pela norma não serão considerados devido ao fato de não haver deformação da carroceria na região do assoalho dianteiro. A descrição detalhada de cada índice está no item 3.1.

2.4 Processo de Geração dos Resultados

O programa MODEFrontier da empresa ESTECO utiliza o DOE (*design of experiments*) a partir do qual são avaliadas diversas populações de resultados. As variáveis de entrada serão alguns dos parâmetros dos componentes do sistema de retenção (cujos elementos já foram apresentados no item anterior). O programa então utiliza algoritmos para buscar as regiões de mínimo (ou máximo) da função objetivo satisfazendo as condições iniciais estabelecidas (restrições para as variáveis de entrada). Neste caso a função objetivo é uma função combinando os índices biomecânicos e devem ser minimizada, conforme item 3.5.

2.4.1 Sequência de Solução – Processo de Otimização

O processo de otimização passa pela construção do modelo do veículo no qual são inseridos os três tamanhos de *dummy*: 5%, 50% e 95%. De posse do modelo completo com sistema de retenção e *dummies* define-se as variáveis de entrada e suas restrições, que serão parâmetros do sistema de retenção.

2.4.2 Variáveis de Entrada

Para cada variável é definido um intervalo dentro do qual a grandeza é alterada à medida que o programa executa o processo de otimização. Os parâmetros escolhidos são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Intervalo das variáveis de entrada do sistema.

	Parâmetros do Sistema de Retenção de Entrada (Variáveis)	
	Min.	Máx.
Desarme da coluna de direção (kN)	0,1	2,0
Força máxima no limitador de força (kN)	2,0	8,0
Tempo de disparo do <i>air-bag</i> (ms)	-30,0	60,0
Tempo de disparo do pré-tensionador (ms)	-30,0	60,0
Força no pré-tensionador (kN)	1,0	4,0
Filmspul (%)	0,1	10,0
Vent-hole (mm)	10,0	40,0

Estes valores são escolhidos com intervalo amplo para permitir que o programa de otimização tenha liberdade de encontrar resultados no processo de otimização. Todos os intervalos como força no limitador, pré-tensionador e desarme da coluna foram escolhidos empiricamente com base na experiência do autor. Uma explicação mais detalhada sobre estas variáveis de entrada está nos itens a seguir.

2.4.3 Air-Bag

Tempo de Disparo – tempo a partir do qual o *air-bag* passa efetivamente a inflar, já descontado o tempo no qual o sinal de aceleração é identificado pelo módulo até o início da inflação. Usualmente este tempo é superior a 11 ms.

Ventil – furo que controla e permite o esvaziamento da bolsa do *air-bag* durante o processo de impacto (desaceleração). Faz o *air-bag* trabalhar como um colchão (e não como uma bexiga) limitando as forças que atuam no ocupante e evitando o efeito de rebote, no qual o ocupante é arremessado para trás por reação ao impacto com a bolsa.

2.4.4 Retrator

Força do pré-tensionador – a força com que o pré-tensionador retém o ocupante no banco. Usualmente a força máxima utilizável em um pré-tensionador é 4.0 kN, acima deste valor podem ocorrer danos aos ocupantes. A contração máxima do cinto fica entre 80 mm e 120 mm quando o cinto envolve o ocupante.

Tempo de disparo do pré-tensionador – o tempo de disparo do pré-tensionador ocorre coordenado com o tempo de disparo do *air-bag* de modo a evitar que o ocupante tenha um deslocamento excessivo para frente antes que o *air-bag* esteja completamente inflado e sofra um impacto de força elevada com a bolsa.

Filmspul – o *filmspul* acontece quando o cinto está enrolado sobre si mesmo e sofre uma força de tração. Como o retrator enrola o cinto com uma força relativamente baixa surge uma folga entre as camadas enroladas do cinto. Desta forma quando o cinto é tracionado com uma força muito maior ocorre *filmspul*, onde uma parte do cinto é liberada do retrator sem que o mesmo sofra rotação do eixo que contem o rebolo do cinto.

Limitador de Força – corresponde à força de tração limite no cinto para que não ocorram ferimentos no ocupante. Quando esta força é excedida, um dispositivo de absorção de energia no retrator libera uma movimentação no cinto relacionada à força de tração que sofre.

2.4.5 Coluna de Direção

Desarme da coluna de direção – corresponde à força axial limite da coluna de direção quando ocorre o impacto do ocupante sobre a mesma. Quando esta força é excedida um dispositivo telescópico dentro da coluna é liberado, permitindo certo deslocamento e assim limitando o nível de esforço sobre o ocupante.

A tabela 2.1 apresenta os intervalos definidos para cada varável, os quais são os valores possíveis definidos pelos fabricantes (com exceção do tempo de disparo do *air-bag* e do pré-tensionador, pois são parte da pesquisa deste trabalho).

2.4.6 População inicial

De posse das variáveis de entrada, utiliza-se o método SOBOL (ver item 3.5.2) para a geração da população inicial de resultados. Esta população é distribuída de maneira relativamente uniforme favorecendo o processo evolutivo do algoritmo genético. Nesta etapa são gerados 40 resultados iniciais que servirão de base para o processo de otimização.

2.4.7 Otimização Através de Algoritmo Genético

Nesta etapa os resultados obtidos a partir da população inicial serão utilizados pelo algoritmo genético MOGA II (Poles, 2003) para a formação das gerações seguintes. A partir de cada geração o algoritmo seleciona os melhores resultados para a geração subsequente. Em cada geração também são introduzidas mutações que permitem maior diversidade de resultados. No processo de otimização são geradas 20 gerações resultando em cada otimização completa um total de 800 simulações.

2.4.8 Pesos dos Índices Biomecânicos

A função objetivo a ser definida no processo de otimização utiliza o método dos pesos, onde é atribuída uma importância para cada índice biomecânico em função de sua frequência e gravidade. O anexo [A] define os pesos com que cada parte do corpo em análise é afetada em um acidente de acordo com o EuroNCAP, enquanto que o anexo [B] apresenta os valores percentuais de ferimentos na cabeça, pescoço, tórax e fêmur para ocorrências de impacto frontal. O peso de cada índice fornecido ao programa para a análise de otimização está na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Pesos dos índices biomecânicos.

Parte do Corpo	Peso
Cabeça	2/9
Pescoço	1/36
Tórax	2/27
Femur	1/108

Observa-se que a cabeça e a seguir o tórax são as regiões do corpo com pesos maiores, portanto mais afetadas no caso de um impacto frontal. Estes resultados foram determinados pelo EuroNCAP e não indicam apenas maior frequência de ocorrência ou gravidade e sim uma combinação dos dois, o que permite identificar a suscetibilidade de cada membro dentro da estatística de acidentes.

2.4.9 Solução Ótima

De posse dos pesos para cada índice biomecânico, variáveis de entrada e a da equação que define a função objetivo (item 3.5.4) chega-se, através do processo de otimização, à solução ótima para cada um dos três tamanhos de *dummy*.

O esquema da figura 2.5 representa todo o processo de otimização para obtenção dos resultados desejados.

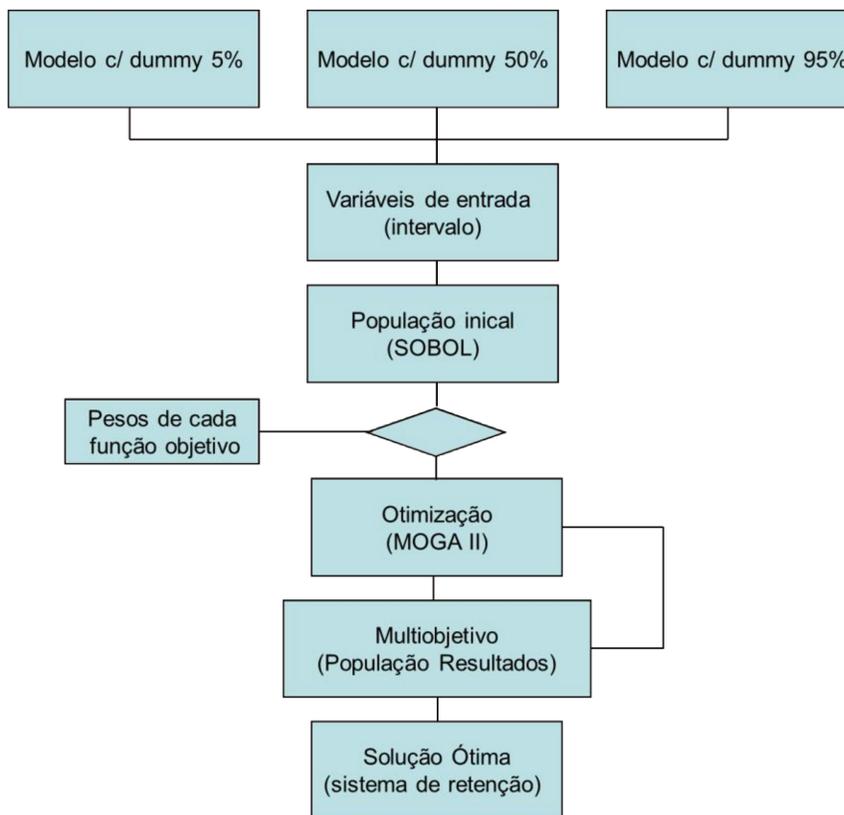


Figura 2.5 Organograma do processo de otimização.

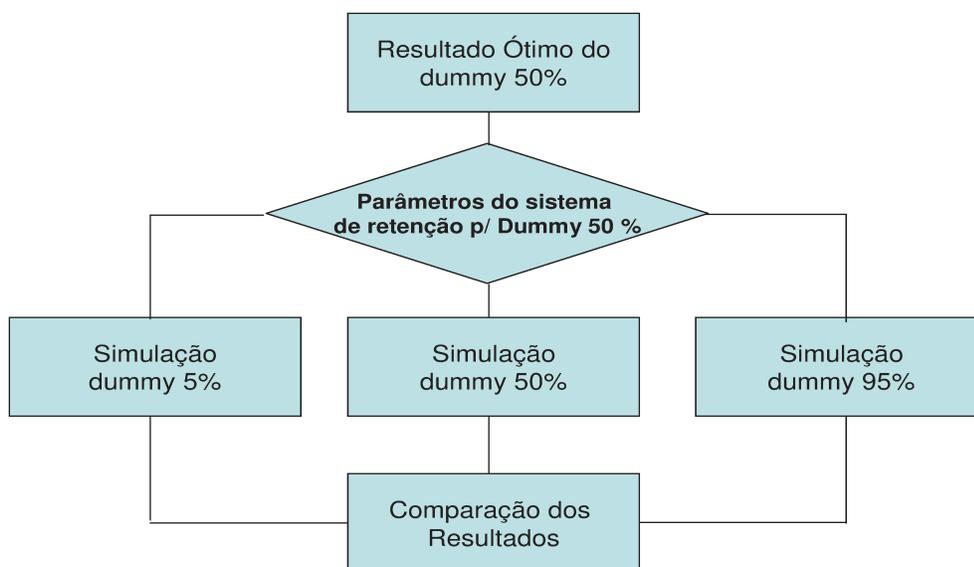


Figura 2.6 Etapa 1: sistema de retenção dimensionado para o dummy 50%, comparação dos índices para os três tamanhos de dummies.

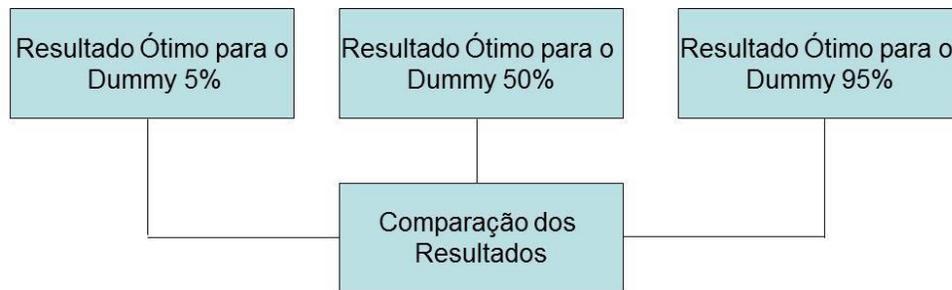


Figura 2.7 Etapa 2 – dimensionamento do sistema de retenção individualmente para cada tamanho de ocupante (adaptativo).

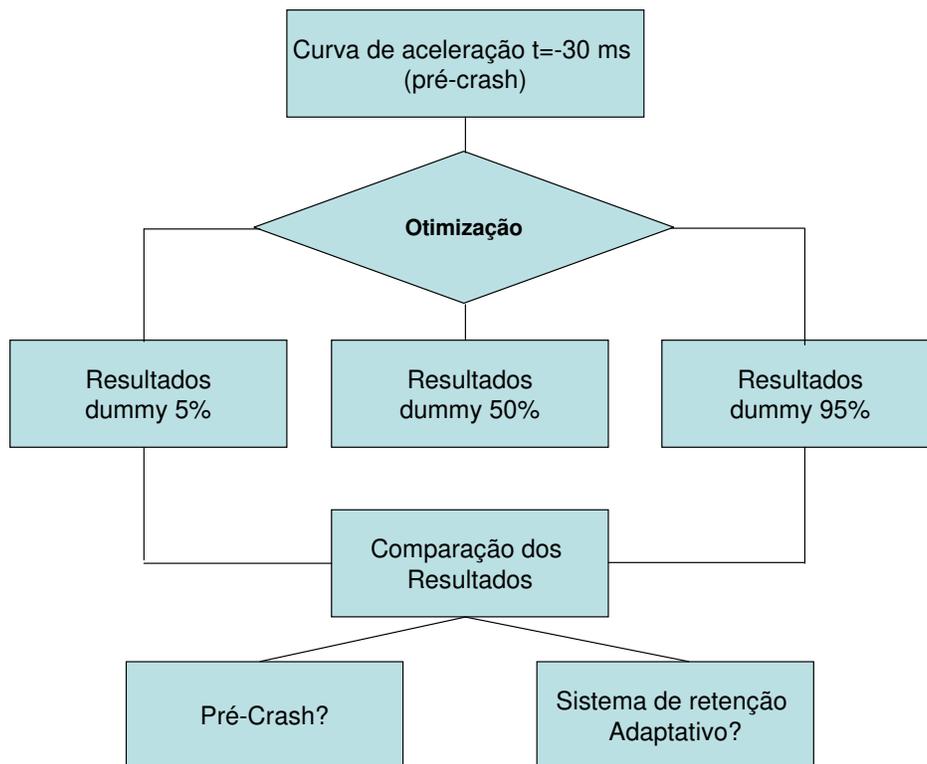


Figura 2.8 Etapa 3: comparação dos resultados utilizando *pre-crash*.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Índices Biomecânicos

O *dummy* HIII (Madymo V5.4, 1999) utilizado nos testes e no modelo representativo de simulação possuem diversos sensores que permitem a medição de índices biomecânicos para avaliação do desempenho em *crash*. Para efeito deste trabalho os índices avaliados serão o HIC (*head injury criteria*), VC (*viscous criteria*), NIJ (*neck injury criteria*) e FFC (*fêmur force criteria*). A tibia (*tibia index*) não entra no escopo deste trabalho, pois os valores são relacionados também aos níveis de deformação na carroceria na região do assoalho dianteiro, e não serão considerados neste estudo, que faz uma avaliação sem a deformação da carroceria, também chamado *sled-test*. A seguir temos uma descrição detalhada de cada um destes índices:

Head Injury Criterion (HIC) – critério mais comum para avaliação do nível de ferimentos na cabeça. Corresponde ao máximo valor da integral da aceleração resultante na cabeça para um determinado intervalo de tempo:

$$HIC = \max_{(T_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq TE)} \left[\left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt \right)^{2.5} \times (t_2 - t_1) \right] \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde T_0 é o tempo inicial do teste/simulação, TE o tempo final do teste/simulação, $R(t)$ aceleração resultante na cabeça em g (medido no centro de gravidade) dentro do intervalo $T_0 \leq t \leq TE$ e t_1 e t_2 os tempos inicial e final para os quais o HIC assume um valor máximo.

Intervalo de tempo que é definido em três alternativas:

HIC – sem limite

HIC36 – máximo para um intervalo de 36 ms.

HIC15 – máximo para um intervalo de 15 ms.

O intervalo de 36 ms é o mais amplamente utilizado e será considerado neste trabalho para o cálculo do HIC. O valor máximo admissível é 1000, ou seja, valores acima deste são considerados com elevada probabilidade de serem fatais para os ocupantes (Kramer, 2006).

Viscous Criteria (VC)– critério para ferimentos no tórax. Os órgãos vitais no interior do tórax como coração, artérias e pulmões são basicamente constituídos por tecidos moles. Estudos demonstram que os tecidos moles são mais sensíveis à taxa de deformação que o tórax sofre em um impacto do que à própria intrusão das costelas (Kramer, 2006). Nestes casos foram encontrados ferimentos no coração e artérias em condições em que o tórax sofrera pequenos deslocamentos, porém a velocidades muito elevadas. Impactos de balas em coletes a prova de balas ou de bolas de beisebol já causaram ferimentos fatais mesmo sem causar ferimento grave aparente. O VC é definido como o valor máximo, em m/s da deformação do tórax no tempo. Valores estes medidos a partir da compressão do peito (impacto frontal) ou das costelas (impacto lateral):

$$VC = \text{máx} \left(\frac{dD(t)}{dt} \times \frac{D(t)}{SZ} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde D(t) é o deslocamento no tempo e SZ é uma constante do *dummy* correspondendo à metade da largura da caixa torácica.

Neck Injury Predictor (NIJ) - é a medida das forças transmitidas através do pescoço (Kramer, 2006). O nome vem da abreviação de *Normalized Neck Injury Criterion* sendo a combinação de quatro forças (ver anexo [F]) : NTE (tensão-extensão), NTF (tensão-flexão), NCE (compressa-extensão) e NCF (compressão-flexão). O N_{ij} é calculado com a seguinte fórmula:

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{zc}} + \frac{M_y}{M_{yc}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Com:

F_z = força no ponto de transição da cabeça para o pescoço.

F_{zc} = força limite.

M_y = momento total

M_{yc} = momento limite.

A norma FMVSS 208 estabelece um valor limite para o N_{ij} de 1.0 para qualquer uma das condições de carga avaliada.

FFC (Fêmur Force Criterion) – é a força de compressão transmitida na direção axial através de cada fêmur. De acordo com a FMVSS 208 esta força não deve ultrapassar o valor de 10 kN.

3.2 Sistema de Retenção

Cinto de segurança – elemento mais importante do sistema de retenção é constituído basicamente por uma fita que parte do retrator até as ancoragens. Apresenta uma trama feita com fios de Polyamida geralmente com banda de 47 mm de largura. Esta configuração lhe confere uma elasticidade que permite um aumento no comprimento de 8% a 13% e uma força limite de tração a partir de 11 kN. Outro efeito relacionado ao cinto é o chamado *film spul*, que corresponde a liberação de parte do cinto devido à folga no seu enrolamento dentro do retrator.

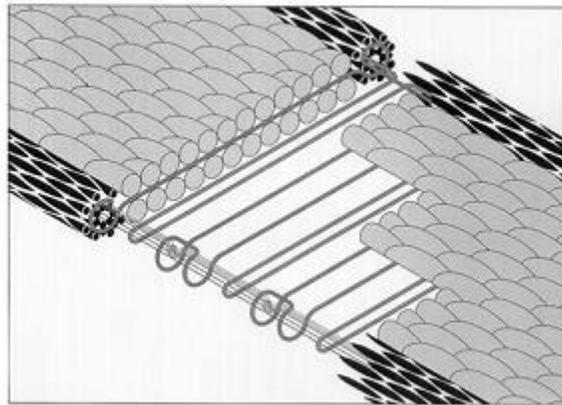


Figura 3.1 Disposição da trama do cinto de segurança (MORELO, 2011).

É responsável por absorver parte da energia da colisão e evitar que os ocupantes impactem contra os componentes do interior do veículo. Atualmente o cinto de segurança continua como o "salvador de vidas número um" do sistema de retenção, sendo que na grande maioria dos automóveis a eficiência dos outros componentes do sistema de retenção depende do seu uso correto.

Sua ancoragem ocorre em pontos estruturais da carroceria ou bancos, de modo que toda a força recebida e transmitida pelo cinto no instante do impacto deve ser resistida por estes componentes.

Basicamente existem quatro configurações para o uso do cinto de segurança: subabdominal, abdominal, três pontos e quatro pontos.



Figura 3.2 Exemplos de configurações de cinto de segurança (KRAMER, 2006).

O cinto de segurança constitui junto com o retrator, pré-tensionador e limitador de carga um subconjunto importante do sistema de retenção.

Pré-tensionador – dispositivo que contrai o cinto durante o início do evento de crash com a finalidade de aumentar a efetividade do sistema de retenção, mantendo o ocupante preso ao assento, compensando assim as folgas do cinto e *filmspul* (liberação de parte do cinto devido à folga de enrolamento dentro do retrator), posição incorreta do ocupante e folga gerada por roupas muito espessas. Outro aspecto importante é posicionar o ocupante de maneira correta para o recebimento do *air-bag*.

Normalmente é constituído por um dispositivo pirotécnico ou elétrico. É disponível nos bancos dianteiros, junto ao retrator do cinto ou ao terminal do cinto nos bancos. Geralmente é acionado a partir de um sinal enviado pelo módulo que mede as acelerações e sensores do veículo (mesma rede que manda o sinal para acionar o *air-bag*). Este dispositivo aciona um pistão ligado

ao cinto fazendo com que o mesmo reduza sua folga, tracionando o cinto até uma determinada força limite (que pode ser de 2.0 KN até 4.5 KN). Assim o ocupante fica retido ao banco, evitando que partes como o tórax e cabeça atinjam os componentes do interior do veículo, como o volante no caso da cabeça e tórax e os joelhos no painel. Além do mais, com a retenção do ocupante na posição correta, o sistema de *air-bag* trabalha com maior eficiência.

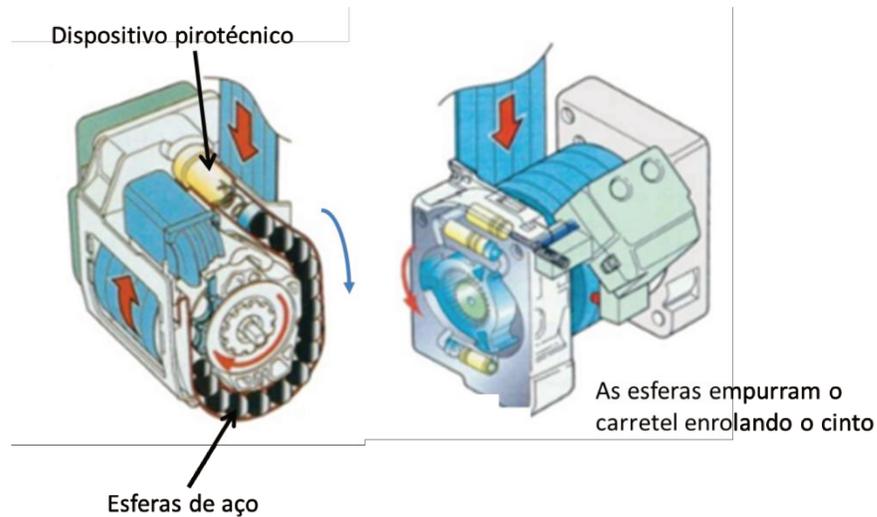


Figura 3.3 Exemplo de disposição do pré-tensionador no retrator do cinto.

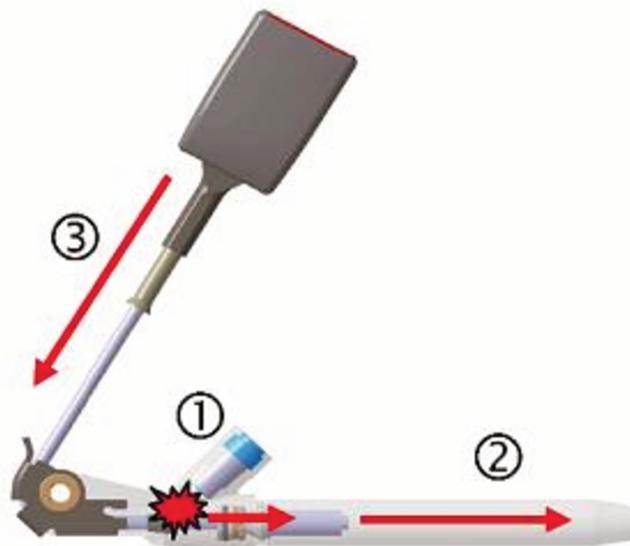
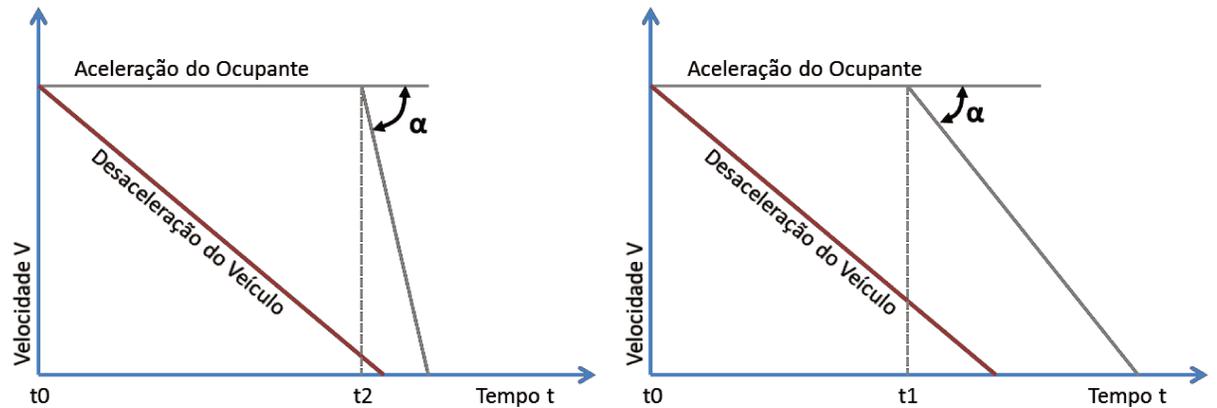


Figura 3.4 Exemplo de pré-tensionador no terminal do cinto. Depois do acionamento do gerador de gás a pressão no interior do cilindro aumenta (1). O pistão se desloca (2) puxando o terminal do cinto para baixo através de um cabo (3) (SCHINDLER, 2008).



α : Aceleração do ocupante
 t_0 : início do impacto, veículo atinge o obstáculo
 t_1 : o ocupante é mantido pelo sistema de retenção
 t_2 : ocupante choca-se contra o interior do veículo

Figura 3.5 Comparativo da aceleração do ocupante no interior do veículo sem o uso do cinto de segurança (esq.) e com o uso do cinto de segurança mais pré-tensionador e limitador de carga (dir.) (KRAMER, 2006).

Limitador de Carga – para evitar forças de pico que possam causar maiores ferimentos nos ocupantes na região do tórax, o sistema de retenção possui um limitador de carga. Basicamente é um dispositivo mecânico que tem a função de liberar parcialmente o cinto quando uma determinada força de tração é alcançada. Um valor normalmente calibrado para esta força fica entre 4.0 kN e 5.0 kN. Neste processo o componente absorve energia através de uma lâmina de aço que sofre deformação plástica ou de uma mola de torção. Durante o evento o cinto cede alguns milímetros promovendo um deslocamento adequado para evitar cargas elevadas e ao mesmo tempo evitar danos ao ocupante devido ao impacto com o interior do veículo.

Normalmente está localizado no retrator, no terminal do cinto preso ao assento, no regulador de altura e no próprio cinto. A figura 3.6 mostra a eficiência do limitador de carga para a aceleração do tórax.

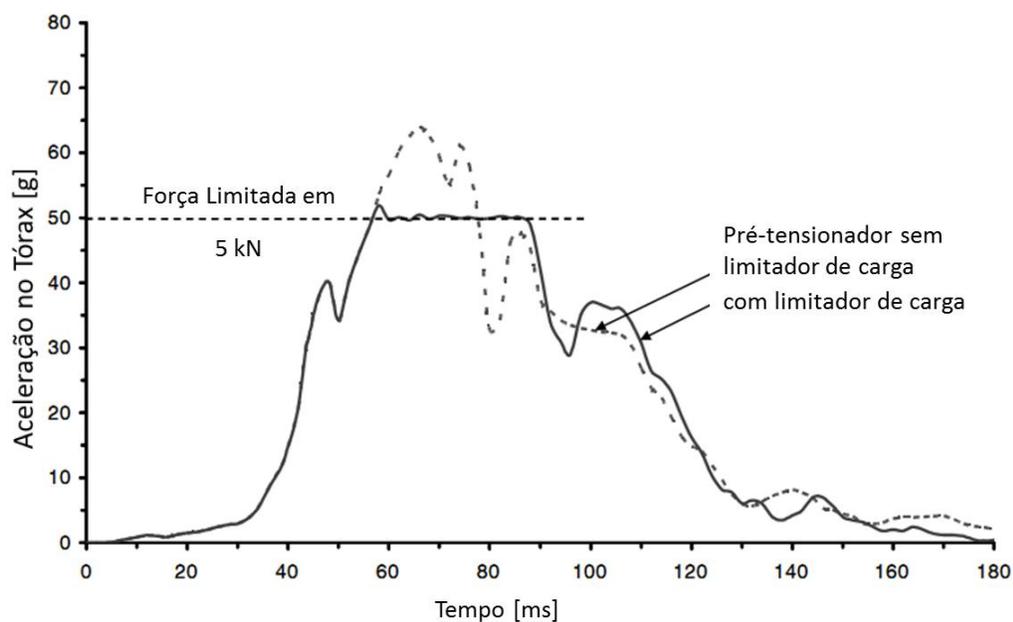


Figura 3.6 Exemplo de ação do limitador de carga na redução de aceleração do tórax (KRAMER, 2006)..

Retrator – componente que permite o conforto dos ocupantes ajustando o cinto automaticamente no momento de sua instalação permitindo a livre movimentação em condições normais (figura 3.7). Apresenta um dispositivo que trava a movimentação do cinto no caso de uma aceleração pequena. O limitador de carga e pré-tensionador normalmente estão agregados a ele.

Basicamente o retrator é constituído por uma mola ligada a um eixo, que enrola o cinto quando livre de qualquer carregamento. Na configuração mais comum esta mola está ligada a uma trava. Esta trava está ligada a uma esfera encaixada em um furo menor que seu diâmetro e posicionada apenas pela gravidade. Quando ocorre uma pequena aceleração gerada até mesmo por uma leve freada do veículo esta esfera se desloca. Este deslocamento da esfera move uma alavanca que se encaixa no eixo da bobina bloqueando o deslocamento do cinto.

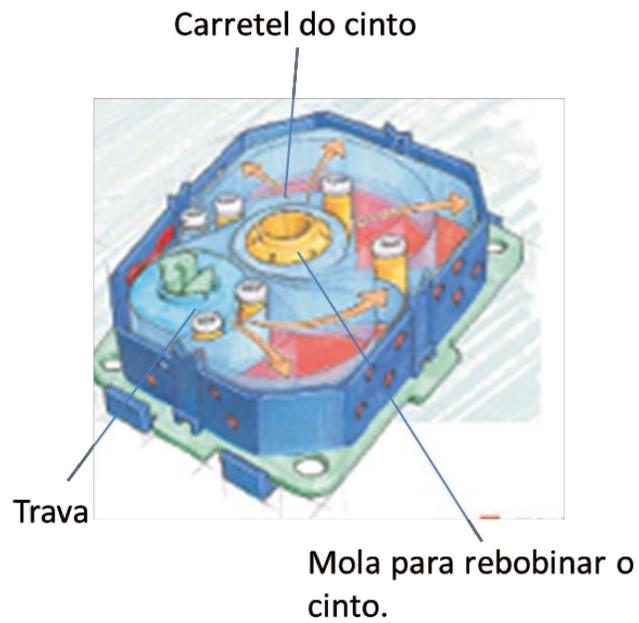


Figura 3.7 Exemplo de retrator para o cinto de segurança (SCHINDLER, 2008).

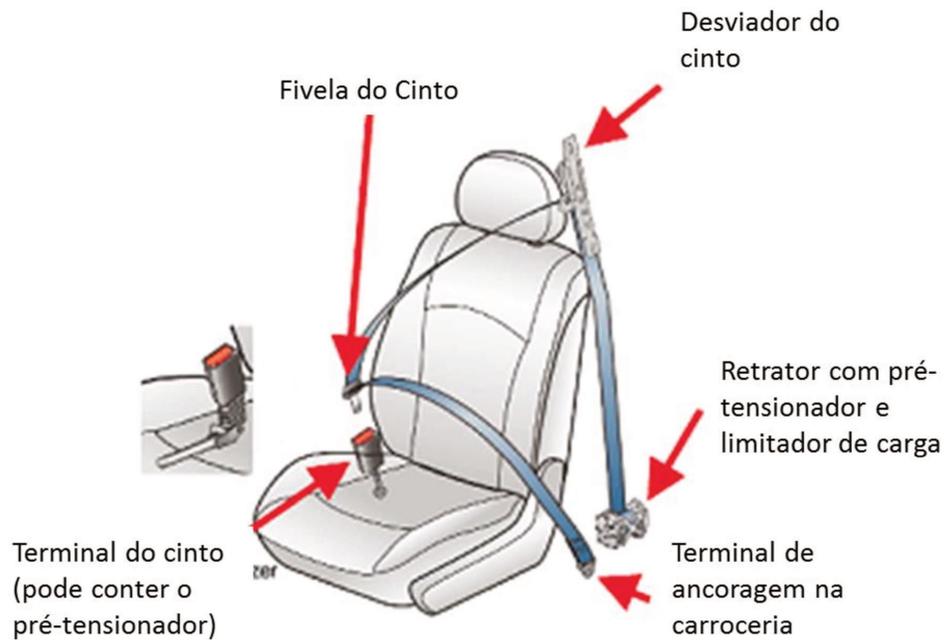


Figura 3.8 Disposição do cinto de três pontos com os demais componentes acoplados (SCHINDLER, 2008)

Air-Bag – o conceito de utilizar uma bolsa inflável para proteção de ocupantes remonta as décadas de 40 e 50, porém a tecnologia da época não permitia a viabilização do dispositivo para o uso em automóveis de passeio de produção em massa. Somente no início da década de 70 foi desenvolvido para uso militar um dispositivo de gerador de gás que pudesse ser adaptado ao desenvolvimento do *air-bag*. Finalmente, no início dos anos 80 surgiu no mercado, através do fabricante Mercedes Benz, o primeiro automóvel de passeio disponível com *air-bag*. Atualmente no mercado Europeu mais de 96% dos automóveis são oferecidos com a bolsa inflável.

O princípio básico de funcionamento do *air-bag* é baseado em uma bolsa que infla num período em torno de até 60 milissegundos, amortecendo o impacto do ocupante com os componentes do interior do carro como volante, para-brisas e painel de instrumentos. Atuando junto como os demais componentes do sistema do cinto de segurança, limita o nível de aceleração, principalmente da cabeça e tórax (no caso de impacto frontal). Normalmente está dentro do volante e do painel, mas existem também versões para impacto lateral, proteção dos joelhos, de cortina e até mesmo presente na banda do cinto de segurança.

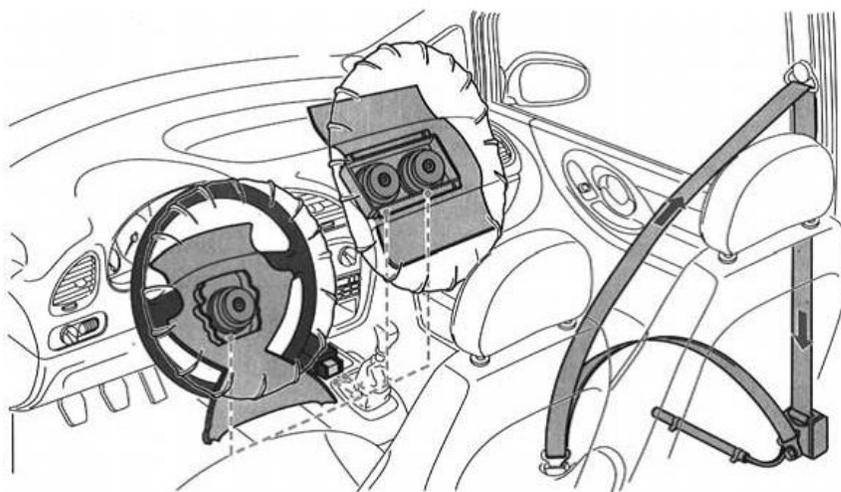


Figura 3.9 Disposição das bolsas infláveis no caso do *air-bag* de ação frontal (KRAMER, 2006).

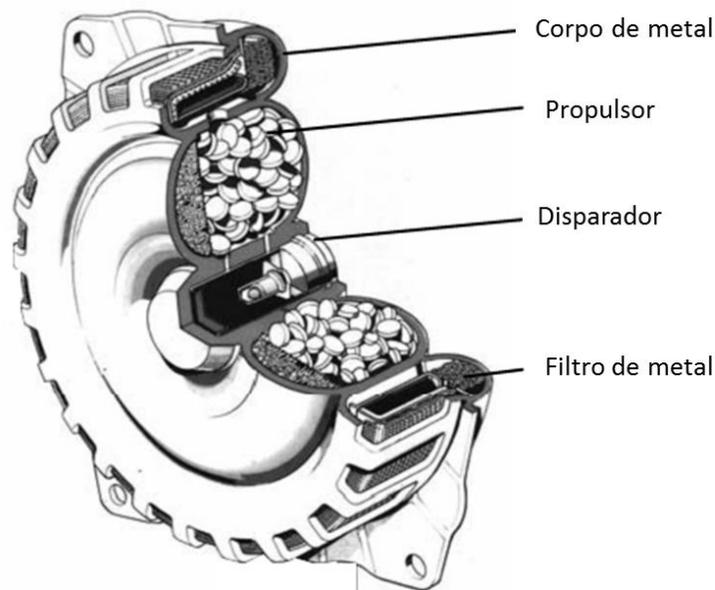


Figura 3.10 Exemplo do dispositivo de geração de gás do *air-bag* (KRAMER, 2006)..

O processo de disparo do *air-bag* ocorre pela ação em sequência de quatro componentes básicos: módulo, sistema eletrônico de comando, o gerador de gás e a bolsa inflável. Quando os sensores do módulo identificam um nível de aceleração elevado, este sinal é enviado ao sistema eletrônico para diagnóstico. Neste é feita a comparação com os valores já armazenados para o veículo (no caso do *air-bag* frontal este sinal corresponde, por exemplo, a um caso de impacto contra barreira rígida a uma velocidade entre 18 e 26 km/h, mas existem diversas condições de calibragem para o acionamento ou não do *air-bag*). Se a análise do programa encontrar valores maiores de aceleração é enviado um sinal para o gerador de gás do *air-bag* e do pré-tensionador (se disponível) para efetuar o disparo.

O gerador de gás é um dispositivo pirotécnico que durante o disparo se inflama rapidamente gerando um gás que infla a bolsa. O propulsor pode ser acetato de sódio NaN_3 ou ácido Hidrazóico H_3N . Durante a combustão a temperatura na câmara pode chegar a 1300 C° . Porém é importante ressaltar que esta temperatura cai bastante durante a inflação da bolsa com a expansão dos gases (em torno de 150 C°), mas ainda com risco de causar queimaduras leves nos ocupantes. O tempo total para o disparo depende da utilização e do volume da bolsa. Um valor típico de tempo está entre 40 e 60 milissegundos. A figura 3.11 apresenta um exemplo típico para o processo de disparo do *air-bag* do motorista.

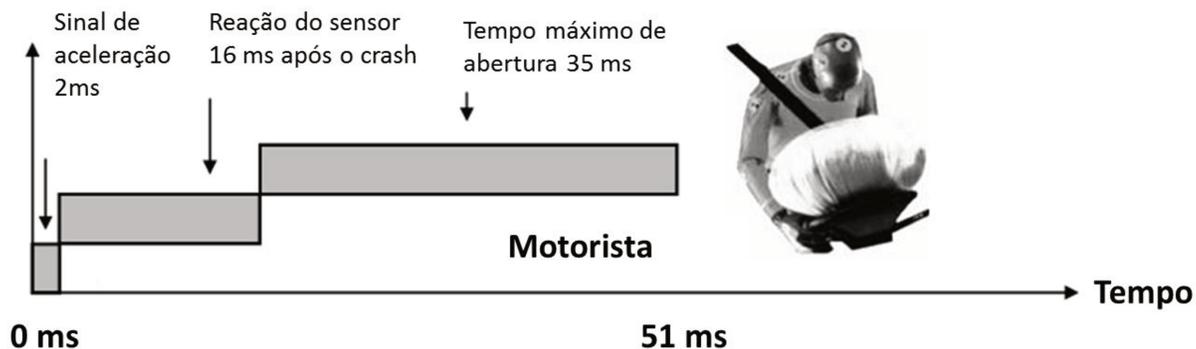


Figura 3.11 Exemplo típico do processo de disparo de um *air-bag* do motorista ao longo do tempo (KRAMER, 2006).

O volume da bolsa pode variar de acordo com o tipo de uso. Normalmente os dispositivos dos veículos comercializados na América do Norte apresentam bolsas com volume em torno de 65 a 80 litros para o motorista e de 160 a 180 litros para o passageiro, volume este necessário para compensar os efeitos do mau posicionamento dos ocupantes relacionado a não utilização do cinto de segurança (não obrigatório em alguns estados dos EUA). Na Europa (assim como na maioria dos veículos comercializados no Brasil) o *air-bag* é dimensionado junto com o sistema de retenção do cinto de segurança, trabalhando em conjunto com o pré-tensionador. Neste caso o volume das bolsas está entre 25 e 35 litros para o motorista e 60 litros para o passageiro. Esta é a condição do modelo analisado neste trabalho.

O material da bolsa atualmente é Poliamida 6.6 (Nylon 6.6) com uma resina de polycloropreno ou silicone. Desta forma são garantidas resistência e permeabilidade adequada da bolsa. Além da permeabilidade, as bolsas possuem furos (normalmente dois) para permitir a saída dos gases amortecendo o impacto do ocupante. Caso contrário, o mesmo poderia ‘quicar’ na bolsa e ser jogado contra o banco, aumentando o risco de ferimentos no pescoço.

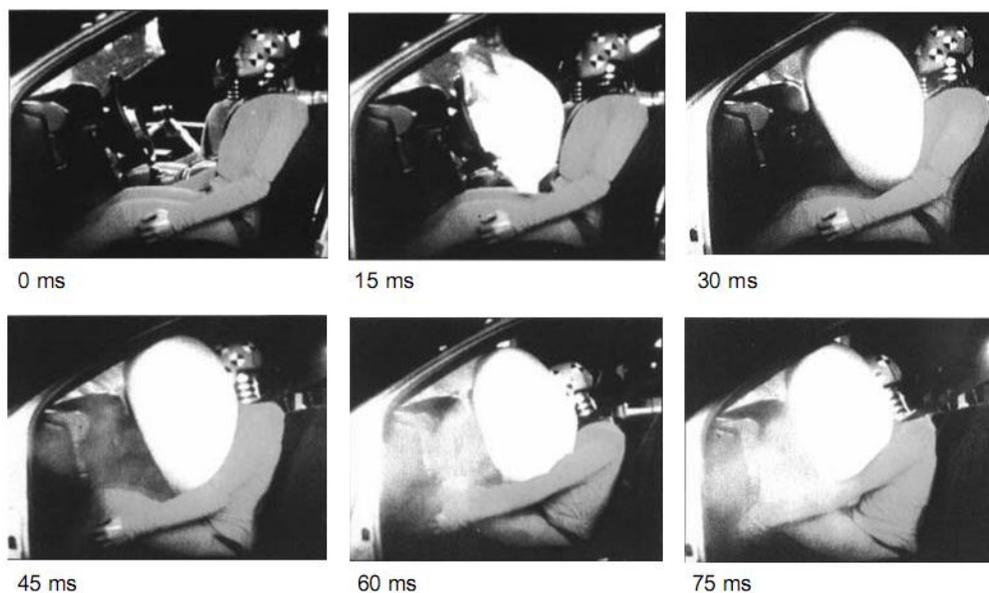


Figura 3.12 Movimentação do ocupante em um teste com barreira rígida a 55 km/h (KRAMER, 2006)..

Banco do motorista – além de oferecer conforto e posicionar corretamente motorista e ocupantes, tem a função de contribuir para evitar que eles escorreguem por baixo do cinto (efeito *submarine*) e limitam o rebote do ocupante jogando-o novamente contra o cinto (efeito *rebound*). Sua estrutura deve ser rígida o suficiente para reter os ocupantes em qualquer condição de impacto, porém sem causar ferimentos neles. Outro elemento importante do assento é o encosto de cabeça, que permite reduzir os ferimentos no pescoço principalmente em caso de impactos traseiros. Atualmente todos os veículos saem de fábrica equipados com encosto de cabeça nos bancos dianteiros. No caso dos bancos traseiros a maioria também tem encostos de cabeça, faltando ainda assim em muitos modelos o encosto para o ocupante do meio.

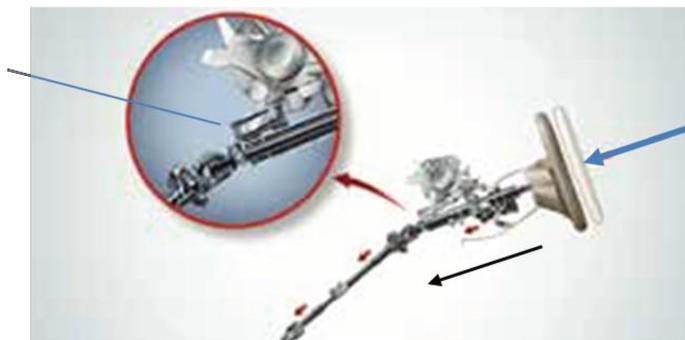
Normalmente os bancos dianteiros tem regulagem longitudinal e de altura, permitindo não só o conforto do ocupante com também o seu posicionamento correto para garantir uma postura adequada em termos de dirigibilidade e segurança. É importante para o sistema de retenção que os ocupantes estejam posicionados corretamente conforme a sua estatura. No âmbito deste trabalho o *dummy* de estatura 50% está localizado nas posições intermediárias de regulagem longitudinal e vertical. O *dummy* 5% está todo a frente e acima, enquanto que o *dummy* 95% está todo recuado e na posição mais baixa.



Figura 3.13 Exemplo de assento dianteiro com encosto de cabeça.

Coluna de direção desarmável – trabalha em conjunto com o *air-bag*. Com relação ao aspecto de segurança, não deve causar ferimentos no motorista quando este entra em contato durante um impacto frontal. Possui um dispositivo telescópico em seu interior que desarma a coluna quando um determinado nível de força é atingido.

Dispositivo desarmável limita a força máxima na coluna.



Força entra através do contato do tórax ou da cabeça do motorista.

Figura 3.14 Coluna de direção com sistema de desarme.

3.3 Modelo de Simulação no MADYMO e Condições de Contorno

MADYMO ©TNO significa MAtheMaticAl DYnamic MOdel é um software utilizado principalmente na simulação de *dummies* em impactos veiculares e na avaliação dos ferimentos

sofridos pelas vítimas de acidentes. Serve para a avaliação de ocupantes em caso de colisões envolvendo diversos meios de transporte como carros, aeronaves, motocicletas e até mesmo bicicletas.

A grande vantagem do programa é combinar em um mesmo modelo o conceito de multicorpos com o de elementos finitos. Adicionalmente possui diversos modelos de juntas cinemáticas para a conexão dos multicorpos e podem ser configuradas com rigidez, amortecimento e atrito. O sistema de unidades utilizado no MADYMO é o SI (sistema internacional de unidades).

3.3.1 Conceito de Multicorpos

A ideia de multicorpos define um sistema de diversos corpos (rígidos ou não) conectados por juntas cinemáticas. As equações cinemáticas permitem conexão dos corpos em estruturas de árvore ou em cadeias fechadas. No MADYMO 3D 12 tipos de juntas estão disponíveis entre as quais as mais utilizadas são a junta esférica, translacional, de revolução, cilíndrica, planar e universal. A quantidade de direções nas quais uma junta permite o movimento entre dois corpos conectados é definida como a quantidade de graus de liberdade da junta. Neste item serão apresentados conceitos básicos necessários para o entendimento do trabalho. Uma consulta mais profunda na teoria deve ser feita na referência bibliográfica.

Um sistema de corpos é definido pela especificação de quais corpos estão conectados por juntas cinemáticas, suas geometrias, distribuição de massa e forma dos corpos, neste caso, para a definição de contatos e pós-processamento.

A forma como os corpos são conectados deve ser definida no arquivo de entrada através da numeração de cada componente de 1 até n. Desta forma é definida uma hierarquia onde o corpo filho é definido como aquele que tem a numeração maior na junção de dois corpos.

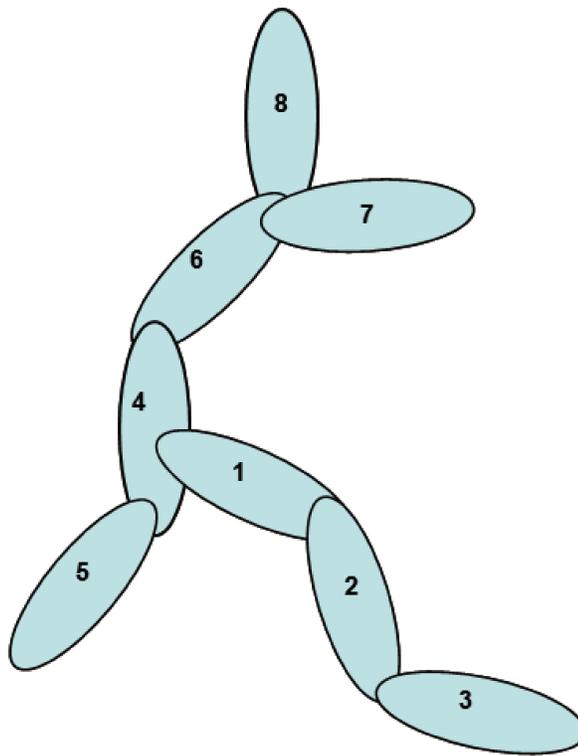


Figura 3.15 Exemplo da montagem de um sistema de corpos.

3.3.2 Inercia de Corpos Rígidos e Posição de Juntas

Um corpo rígido é definido pelo momento de inércia, produtos de inércia e localização do centro de gravidade. A partir destas definições a geometria do corpo não é necessária, com exceção dos casos onde o corpo entra em contato com outros corpos.

Cada corpo rígido é definido com um sistema de coordenadas, que por definição, é localizado na junta que une este com o corpo pai. No caso do corpo original, que apenas tem conexão com corpos filhos o sistema de coordenada pode ser definido arbitrariamente.

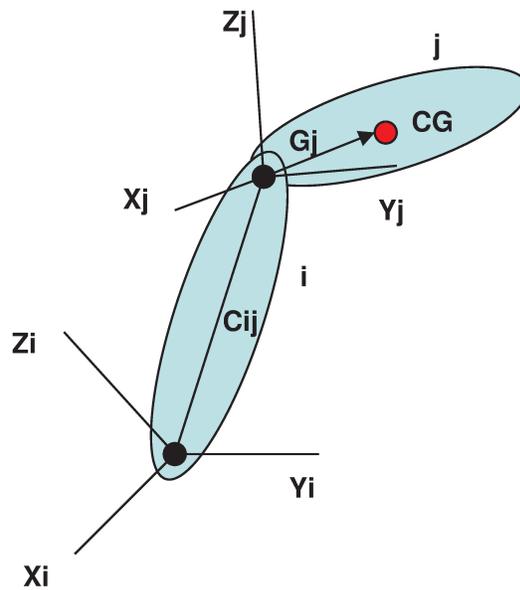


Figura 3.16 Exemplo da montagem de um sistema de corpos.

3.3.3 Cinemática de Corpo Rígido

A equação do movimento de um corpo rígido é definida pela localização deste em relação à origem e a orientação do sistema de coordenadas local em relação à origem.

A posição do sistema local de coordenadas relativo ao sistema de coordenadas inercial é definida pelo vetor r_i . A orientação deste sistema de coordenadas local em relação ao sistema de coordenadas inercial é definida pela matriz \underline{A}_i . O vetor definindo uma posição arbitrária do corpo rígido X_i em relação à origem do sistema de coordenadas local é definido a seguir:

$$X_i = r_i + x_i \quad \text{Equação 3.4}$$

Na forma matricial:

$$\underline{X}_i = \underline{r}_i + \underline{A}_i \underline{x}_i \quad \text{Equação 3.5}$$

Ou:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{12} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad \text{Equação 3.6}$$

Os vetores \underline{X}_i e \underline{r}_i representam a posição relativa ao sistema de coordenadas inercial dos vetores X_i e r_i . A matriz de rotação \underline{A}_i relaciona os componentes relativos do sistema de coordenadas de um vetor fixo no corpo com os componentes relativos ao sistema de coordenadas inercial.

A primeira derivada no tempo pode ser definida por:

$$\dot{X}_i = \dot{r}_i + \omega_i \times x_i \quad \text{Equação 3.7}$$

Com ω_i representando a velocidade angular do corpo. A segunda derivada é dada por:

$$\ddot{X} = \ddot{r} + \dot{\omega} \times x_i + \omega_i \times (\omega_i \times x_i) \quad \text{Equação 3.8}$$

3.4 Método dos Elementos Finitos

Os conceitos aqui apresentados são na profundidade para o desenvolvimento e entendimento do trabalho. Para uma consulta mais profunda deve-se consultar a referência bibliográfica.

O método dos elementos finitos é usado para representar uma estrutura contínua através de um modelo numérico discreto. A equação do movimento de um modelo de elementos finitos é:

$$\underline{M}\underline{a} + \underline{D}\underline{v} + \underline{K}\underline{u} = \underline{F}_{ext} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde \underline{M} , \underline{D} e \underline{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez reespectivamente. F_{ext} é a coluna de forças aplicadas externas. As matrizes \underline{a} , \underline{v} e \underline{u} , são a aceleração nodal, coluna velocidade e coluna de deslocamento respectivamente. A matriz \underline{D} é construída normalmente na forma de Rayleigh:

$$\underline{D} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K} \quad \text{Equação 3.10}$$

Com α e β como coeficientes de amortecimento. No modelo de elementos finitos do Madymo o amortecimento de Rayleigh é definido com a dependência do tempo de α e considera-se $\beta = 0$. Portanto a equação de equilíbrio pode ser transformada na forma:

$$\underline{M}(\underline{a} + \alpha \underline{v}) = F_{ext} - F_{int} \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde $F_{int} = \underline{K} \underline{u}$, é denominada coluna de forças nodais internas.

Além da discretização espacial é necessária uma discretização temporal, ou seja, as grandezas que descrevem o comportamento da estrutura são calculadas em um número discreto de passos no tempo. Para isto é utilizado o método de integração direto, é o cálculo da variação dos deslocamentos, velocidades e acelerações em cada intervalo de tempo. O tamanho de cada passo para o cálculo do modelo determina a precisão, estabilidade e custo da solução. No MADYMO em cada passo é utilizado o método de diferenças central para o cálculo do modelo:

$$v_{n+\frac{1}{2}} = v_{n-\frac{1}{2}} + \Delta t \cdot a_n \quad \text{Equação 3.12}$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \cdot v_{n+\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 3.13}$$

Nas equações 3.12 e 3.13 v corresponde à variável que define velocidade e u o deslocamento. Incorporando a equação de diferenças central na equação do movimento obtém-se:

$$v_{n+\frac{1}{2}} = A_1 v_{n-\frac{1}{2}} + A_2 M^{-1} (F_{ext} - F_{int}) \quad \text{Equação 3.14}$$

Onde:

$$A_1 = (1 - \frac{1}{2} \alpha \Delta t) / (1 + \frac{1}{2} \alpha \Delta t) \quad \text{Equação 3.15}$$

$$A_2 = \Delta t / (1 + \frac{1}{2} \alpha \Delta t) \quad \text{Equação 3.16}$$

A matriz de massa M utilizada na equação 3.14 é diagonalizada, portanto sua inversão é trivial. No MADYMO considera-se o coeficiente $\alpha = 0$, portanto o amortecimento não é utilizado. No método da diferença central os valores de deslocamentos, velocidades e acelerações são calculadas a partir das condições anteriores. Este método é condicionalmente estável, o que significa que o *time-step* precisa ser suficiente pequeno para uma solução estável. Para sistemas lineares não amortecidos o *time-step* é limitado por:

$$\Delta t \leq 2 / \omega \quad \text{Equação 3.17}$$

Onde ω é o maior autovalor existente na malha. Um exemplo simples para um elemento linear com dois nós de comprimento L é:

$$\Delta t = L / c \quad \text{Equação 3.18}$$

Onde c é a velocidade do som no material:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Equação 3.19}$$

Com E e ρ módulo de elasticidade do material e sua densidade respectivamente. Interpretando fisicamente, o *time-step* deve ser pequeno o suficiente para assegurar que uma onda sonora não passe por um elemento em um único *time-step*. Normalmente os programas de análise dinâmica corrigem este problema aumentando a densidade dos elementos o que aumenta o seu

time-step. Esta correção deve ser observada com cuidado pelo engenheiro, pois um aumento exagerado da massa pode levar a um aumento considerável da massa no modelo, alterando assim o resultado final.

3.4.1 Modelo de Air-Bag

O processo de inflação do *air-bag* é modelado como um volume em expansão pelo qual existe fluxo de entrada e saída de massa. Basicamente a entrada de massa ocorre através do gerador de gás e a saída através de orifícios de exaustão e da porosidade do tecido. A troca de massa na câmara do *air-bag* pode ser equacionada da seguinte forma:

$$\dot{m} = \dot{m}_s + \dot{m}_i + \dot{m}_{ex} \quad \text{Equação 3.20}$$

Com \dot{m}_s massa proveniente do gerador de gás, \dot{m}_i massa fluindo para o interior da câmara e \dot{m}_{ex} a massa exaurida da câmara.

A massa exaurida influencia de maneira fundamental o desempenho do *air-bag*. Se o escape de gases da bolsa for relativamente pequeno a bolsa pode adquirir uma rigidez tal que o impacto do ocupante contra ela (alta rigidez) e seu rebote para trás (efeito mola) podem causar sérios danos ao ocupante. Se o escape de gases for demasiado a bolsa se desinfla rapidamente, principalmente após o contato do ocupante, resultando em impacto do mesmo contra as partes interiores do veículo. Como a permeabilidade da bolsa pode ser considerada constante o desempenho do *air-bag* usualmente é calibrado no valor do diâmetro do furo de exaustão.

No código fonte do MADYMO a área do furo do *air-bag* A , é inserida em conjunto com outros três parâmetros para o cálculo da área efetiva. Esta é, na verdade, menor que a área efetiva real, devido a efeitos não isotrópicos de fluxo. Este efeito é representado pelo coeficiente CD_{ex} definindo a equação da área efetiva por:

$$A_{eff} = CD_{ex} A \quad \text{Equação 3.21}$$

O segundo fator é o CD_p , que considera a expansão do tecido e seu efeito no tamanho do furo devido à pressão na bolsa. Por fim o terceiro fator, CD_t , representa o escape dos gases em função do tempo. Por fim a fórmula da área efetiva é representada por:

$$A_{eff} = CD_{ex} CD_p CD_t A \quad \text{Equação 3.22}$$

3.5 Conceitos de Otimização e *Design of Experiments* (DOE)

O processo de otimização consiste em levar uma grandeza de um sistema a um valor máximo ou mínimo respeitando as limitações e restrições do mesmo. Esta grandeza, que é denominada função objetivo, pode ser uma única característica do sistema ou uma função que combina várias delas. O esquema para execução da otimização por DOE utilizando o ModeFRONTIER está no apêndice [A]. Basicamente os componentes do processo de otimização podem ser definidos em quatro partes:

Função objetivo – grandeza do sistema que se busca minimizar ou maximizar, ela depende das características do sistema e das variáveis de entrada. Pode ser um único valor de saída ou uma função de vários resultados.

Variáveis de entrada – parâmetros de entrada do sistema são as grandezas cuja variação altera os resultados finais da função objetivo.

Restrições – limites estabelecidos para as variáveis de entrada ou outros parâmetros do sistema. Estes limites podem ser definidos em função de limitações físicas do sistema ou escolhidos arbitrariamente pelo engenheiro.

Algoritmo de Otimização – algoritmo que analisa o comportamento do sistema e varia os valores das variáveis de entrada com a finalidade de buscar o mínimo/máximo da função objetivo respeitando as restrições estabelecidas.

Dentro do processo de otimização existem vários métodos para se analisar a função objetivo. A escolha pode ser feita de acordo com o número de variáveis, tamanho e complexidade do sistema e da forma da função objetivo.

Para problemas que envolvem muitas variáveis, com alto grau de não linearidade e variáveis discretas é recomendável a utilização do método DOE (*Design of Experiments*) (Poles, 2003). Neste trabalho é utilizado o método SOBOL (ver item 3.5.2) para a geração da população inicial e o algoritmo genético MOGAI (item 3.5.1) para o processo de otimização na solução do sistema de retenção.

No DOE utiliza-se um método para a geração de resultados que ocupem o espaço estudado em questão. Atualmente existem alguns métodos para geração destes resultados dentro do espaço estudado. Basicamente eles subdividem as variáveis de entrada e fazem uma combinação destas subdivisões, a partir destes valores a função objetivo retorna um valor específico. Com várias combinações obtém-se uma distribuição que preenche o espaço de estudo e permite a análise do comportamento da função objetivo dentro deste espaço.

Os conceitos apresentados neste item são introdutórios e suficientes para o escopo deste trabalho. Para um estudo mais profundo deve-se consultar nas referências (Poles, 2005) e (Poles, 2005).

3.5.1 Algoritmo Genético

O algoritmo genético é um método de otimização já bastante difundido (Poles, 2005). Sua principal característica é a analogia do processo evolutivo das criaturas na natureza. A convergência da função objetivo surge após inúmeras gerações e sua velocidade depende das variáveis de entrada das características do sistema. Apresenta vantagem em relação aos métodos clássicos, que apresentam restrições com funções não contínuas e com diversos mínimos locais. Seu surgimento data da década de 50, quando pesquisadores da área de biologia pesquisavam algoritmos para simular sistemas biológicos complexos. Os primeiros estudos da sua utilização em engenharia ocorreram na década de 70 na Universidade de Michigan, sob a supervisão do pesquisador John Holland (1975). No final da década de 80, David Goldberg apresentou as primeiras soluções de problemas complexos de engenharia utilizando algoritmos genéticos (F. Pereira Saramago, 2003)

O termo cromossomo, emprestado da biologia, corresponde a uma combinação de genes. Cada gene corresponde a uma variável e tem um comprimento m . Seja uma função de três variáveis x , y e z , e que para cada variável o comprimento m do seu gene seja 5:

$$F(x, y, z) \Rightarrow n = 3 \quad \text{Equação 3.23}$$

Ou seja, o cromossomo é composto por três genes. Agora seja cada gene representado, por exemplo, por:

$$\begin{array}{ll} x = [10110] & \text{O cromossomo será então:} \\ y = [00101] & [10110,00101,11101] \\ z = [11101] & \end{array}$$

O comprimento do gene é definido pelo tamanho do espaço amostral e pela precisão das variáveis (número de decimais). Basicamente o avanço de uma geração para outra é baseada em três características básicas:

- **Reprodução**, baseada no encontro dos indivíduos com as melhores características. Ou seja, aqueles elementos que possuem maior contribuição para a função objetivo têm maiores probabilidade de reproduzir e gerar descendentes (eq. 3.24). Os que não contribuem ou contribuem negativamente para a função objetivo não reproduzem. Com isso a tendência é a geração de indivíduos mais aptos nas gerações seguintes.

$$P_i = \frac{f(x)}{F(x)}, \text{ onde } F(x) = \sum f(x) \quad \text{Equação 3.24}$$

- **Cross-over**, onde as características dos indivíduos mais aptos são combinadas para a geração seguinte. Neste caso a quantidade de indivíduos que vai participar do *crossover* depende da probabilidade de reprodução calculada para todos os indivíduos. Os pares serão sorteados a partir de números randômicos. O ponto k , que define a posição de troca no gene é determinado aleatoriamente e é determinado pela seguinte fórmula:

$$k = 1 + \text{rand}[(n \times m - 1) - 1] \quad \text{Equação 3.25}$$

Onde m é o número de alelos (códigos 0/1 dentro de um gene) e n é a quantidade de genes do cromossomo. Conforme a figura 3.17 uma parte do gene é enviada para o par e vice-versa.

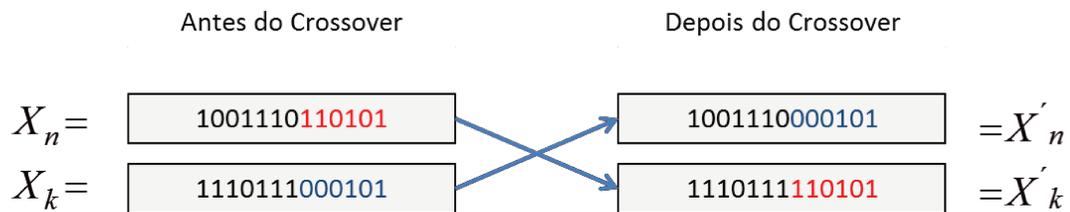


Figura 3.17 Exemplo de processo de crossover.

- **Mutações**, que são mudanças aleatórias de uma geração para outra, permitindo o surgimento de novas características no processo evolutivo. Neste caso um alelo de valor 1 passa a 0 e vice-versa. Normalmente o alelo que sofre mutação é escolhido aleatoriamente e a probabilidade de ocorrer mutação depende de parâmetros de entrada, que são selecionados pelo usuário do algoritmo. Um valor recomendado neste caso é não maior que 1%. A figura 3.18 exemplifica uma ocorrência de mutação.

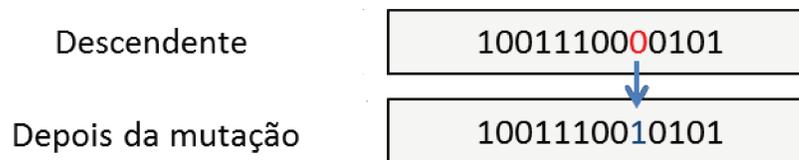


Figura 3.18 Exemplo de mutação em descendente.

O valor das variáveis que apresentam uma correlação positiva com a função objetivo tem mais chance de reprodução e avançar para as gerações seguintes. Os genes dos pais são combinados na geração do filho que pode também incluir a mutação de algum gene no processo. Como resultados do processo evolutivo indivíduos mais aptos prosseguem enquanto que os menos aptos não transmitem suas características para as gerações seguintes.

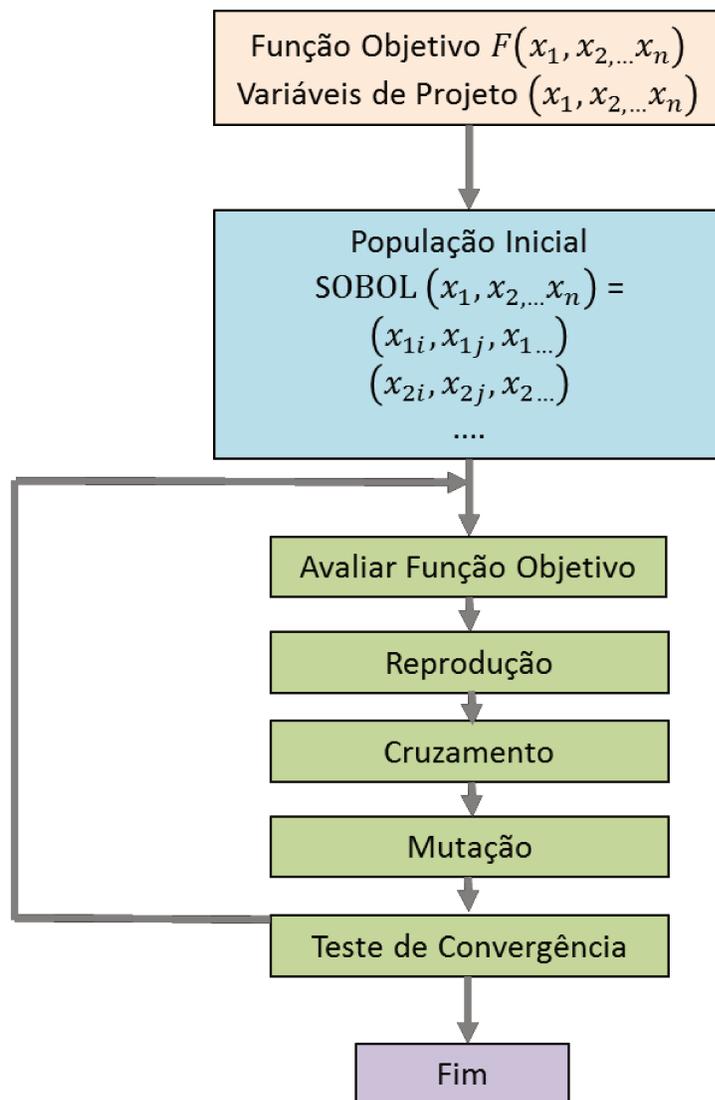


Figura 3.19 Processo de otimização utilizando algoritmo genético.

O algoritmo genético é recomendado principalmente em problemas com variáveis discretas e quando o tempo de cada solução individual é relativamente baixo. Outra vantagem é que ela não corre o perigo dos mínimos locais como os métodos tradicionais. Porém deve-se considerar que o tempo computacional será elevado, devendo o usuário ponderar previamente a sua estratégia do processo de otimização. Uma análise profunda destes conceitos pode ser consultada nas referências (Poles, 2003) e (F. Pereira Saramago, 2003).

No trabalho em questão é utilizado o algoritmo MOGA II, presente no programa modeFRONTIER™ 4 .

3.5.2 População Inicial

Para a realização do processo de otimização é necessária a formação da primeira geração. A importância no cuidado com a geração inicial está no fato que ela pode influir diretamente no tempo de análise e no resultado final. Normalmente os métodos para a geração da população inicial fazem uma distribuição aleatória no domínio da função objetivo. Dentre os métodos mais recomendados para trabalhar em parceria com o algoritmo genético está o SOBOL. Este método é o mais recomendado para a geração de uma distribuição uniforme no domínio (Mastinu, 2006). É um algoritmo determinista que imita o comportamento da sequência aleatória: o objetivo é novamente a amostragem uniforme do espaço design. Neste caso os efeitos de agrupamento da amostragem aleatória são reduzidos.

Este tipo de sequência é denominada quasi-random: termo um tanto inapropriado, uma vez que não há nada aleatório neste algoritmo. Os experimentos deste tipo de sequência são maximamente distribuídos, preenchendo de forma uniforme o espaço de design.

O grau de associação é representado pelo intervalo entre -1 e 1. Se uma correlação entre duas variáveis é 1 significa que elas estão correlacionadas positivamente e a influência de uma na outra é direta. Uma correlação positiva é representada em uma curva com coeficiente angular positivo. Quando a correlação entre duas variáveis é nula significa que a variação de uma variável não produzirá efeito na outra. Uma correlação negativa ocorre quando a variação de uma das variáveis produz um efeito inverso na outra. A relação pode ser representada por uma curva com inclinação negativa. Esta avaliação é importante para determinar também se as variáveis tem algum grau de independência, o que permite melhor entendimento do comportamento do sistema.

3.5.3 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste em verificar se, para o resultado ótimo encontrado numa pequena variação nas variáveis de entrada, ocorre uma grande variação nos resultados de saída. Isto significa que o sistema pode ser instável para determinados valores de função objetivo sendo difícil na prática chegar aos resultados encontrados na otimização.

3.5.4 Método das preferências

O método das preferências é uma maneira eficiente quando existe uma função multiobjetivo (Poles, 2005). Ele consiste em uma combinação de duas ou mais funções que se deseja minimizar. Neste trabalho, por exemplo, cada índice biomecânico (HIC, VC, NIJ e FFC) deve ser minimizado. Uma função a ser minimizada e que combine estes índices pode ser definida como multiobjetivo. Para cada índice dentro desta função podem ser definidos pesos, de acordo com a sua importância. No sistema em questão a equação da função objetivo através do método das preferências é definida conforme a equação a seguir:

$$\min_{\mathbf{x} \in F} \lambda_1 f_1(\mathbf{x}) + \lambda_2 f_2(\mathbf{x}) + \dots + \lambda_n f_n(\mathbf{x}) \quad \text{Equação 3.26}$$

onde $0 \leq \lambda_i \leq 1$ e $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

Com f_n as funções objetivo e λ_n os pesos de cada função. Atribuindo os pesos fornecidos na tabela 2.2 a equação da função objetivo fica:

$$F_{\text{obj}} = 0,2222 * \text{HIC} + 0,074074 * \text{VC} + 0,02778 * \text{NIJ} + 0,009259 * \text{FFC} \quad \text{Equação 3.27}$$

A teoria apresentada neste item é suficiente para o entendimento e desenvolvimento do trabalho. Qualquer consulta mais profunda pode ser feita através da referência bibliográfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dimensionando o Sistema de Retenção para o *Dummy* 50%

Nesta etapa os resultados apresentados contemplam um sistema de retenção que foi dimensionado para o ocupante 50%. A comparação dos resultados dos índices biomecânicos do *dummy* 50% com os demais tamanhos demonstra que os ocupantes de maior e menor estatura apresentam certos índices biomecânicos mais críticos para a mesma condição de impacto. A tabela 4.1 apresenta os resultados dos índices biomecânicos e o valor função objetivo (ver equação 3.27) de cada estatura. Uma primeira observação a partir da função objetivo leva a concluir que o ocupante de estatura 5% tem os melhores resultados. Porém adota-se uma posição conservativa ao observar que a menor estatura significa que o ocupante pode ser mais sensível a um mesmo tipo de carregamento que um ocupante de estatura 50% ou 95%. Neste caso qualquer índice biomecânico que esteja muito acima do valor de referência da estatura 50% pode significar uma severidade excessiva (violação de critério) mesmo que o seu peso seja relativamente baixo dentro da função objetivo.

O gráfico 4.1 apresenta os resultados da simulação do MADYMO para os três tamanhos. Observa-se que os resultados são piores na região do pescoço [NIJ] e tórax [VC] para os ocupantes de estatura 5% e 95%.

Tabela 4.1 Resultados dos índices biomecânicos para um sistema de retenção dimensionado para o ocupante de estatura 50%

Estatura do Ocupante	Máx FFC [kN]	HIC	Máx NIJ	VC [m/s]	Função Objetivo
5%	1221	268	0,31	0,30	71
50%	5448	332	0,22	0,21	124
95%	7258	287	0,58	0,41	131

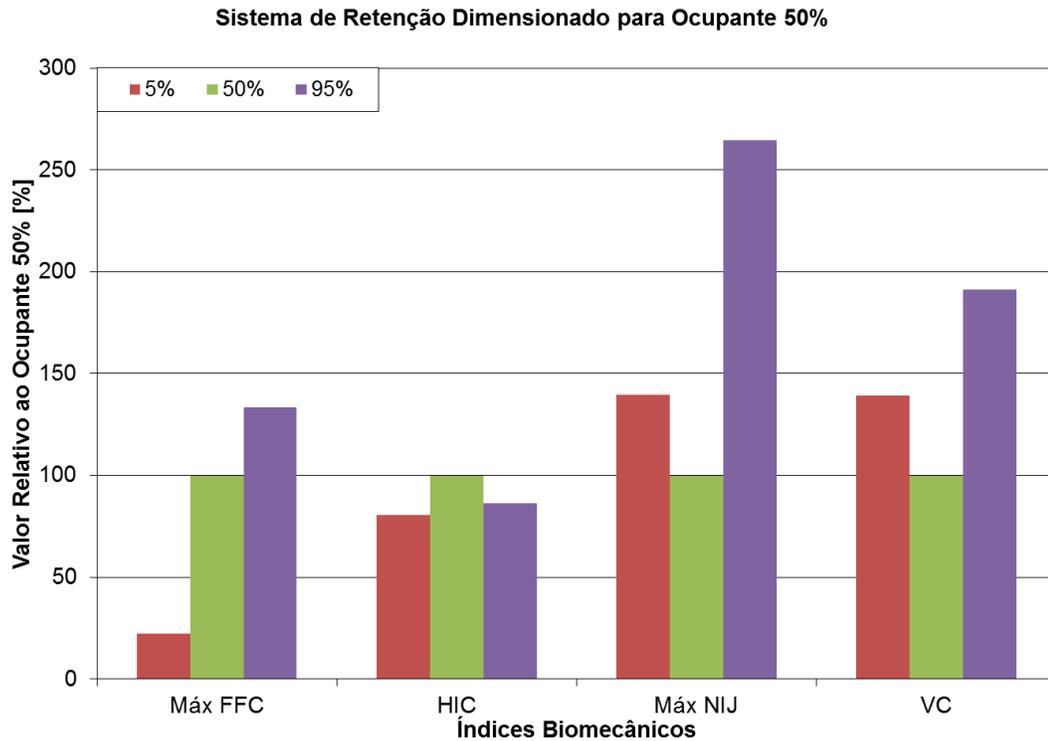


Gráfico 4.1– Resultados Biomecânicos (porcentual relativo ao tamanho 50%).

Os resultados de fêmur (FFC) são sensíveis principalmente pelo contato do joelho com o painel. Na simulação são significativamente melhores para o ocupante 5% e piores para o 95%. Fisicamente isto significa que, independente do sistema de retenção, o ocupante de menor estatura tem a vantagem na região das pernas, pois mesmo com o assento posicionado à frente, apresenta boa distância do joelho ao painel. Ao mesmo tempo a força do pré-tensionador é eficiente na redução da força de contato do joelho com o painel. Por outro lado, a estatura maior do *dummy* 95% apresenta um índice de fêmur pior devido à maior proximidade do joelho com o painel. Mesmo com o assento na posição mais recuada, a dimensão maior das pernas, combinada com a força insuficiente de retenção, principalmente a partir do pré-tensionador, resultam em maior força de contato do joelho com o painel. A tabela 4.2 apresenta os valores dos parâmetros do sistema de retenção encontrados para o sistema dimensionado para o ocupante de estatura 50%.

Tabela 4.2 Parâmetros do Sistema de retenção otimizados para o *dummy* 50%

Desarme Coluna de Direção (kN)	Limitador de Força (kN)	Load Filmspul (%)	Força do Pré Tensionador (kN)	Tempo de Disparo do Airbag (ms)	Tempo de Disparo do Pré Tensionador (ms)	Furo de Escape de Ar (Airbag) (mm)
2,3	3,0	0,8	2,8	11,0	16,4	27

Os resultados de tórax (VC) são influenciados principalmente pelo contato do tórax com o cinto de segurança, coluna de direção e *airbag*. Os valores são piores nos dois casos, mas por motivos diferentes. O *dummy* 5% é prejudicado principalmente devido à força do pré-tensionador, que é relativamente alta para esta estatura e comprime excessivamente o tórax. Por outro lado, o *dummy* 95%, de massa maior, é prejudicado pela força insuficiente do pré-tensionador, que faz com que o mesmo se desloque com maior velocidade contra o sistema *air-bag*/volante.

A influência do *air-bag* não se demonstrou nos valores do HIC, que não apresentaram resultados piores aos do *dummy* 50%. O ocupante 5% neste caso é beneficiado pelo pré-tensionador que restringe mais o seu deslocamento (e conseqüentemente da cabeça) comparado aos outros dois ocupantes, reduzindo a força de contato com o conjunto *airbag*/volante. Seu resultado pior de pescoço, entretanto indica que existe um giro considerável da cabeça em relação ao tórax. O ocupante 95% é beneficiado com HIC melhor não pela força do pré-tensionador e sim pela sua maior distância em relação ao volante. Porém, do mesmo modo que no *dummy* 5% o tempo inadequado de contato com o *air-bag* faz com que o resultado de pescoço seja ruim.

4.2 Dimensionamento do sistema de retenção para cada tamanho de ocupante

Neste caso foram extraídos no processo de otimização os parâmetros do sistema de retenção que são ideais para cada ocupante. Quando os valores dos parâmetros ideais para o 50% são comparados com os ideais para os outros dois ocupantes (95% e 5%), fica evidente que cada estatura demanda uma configuração própria. Isto indica que não é possível fazer com que um ocupante tenha um nível de segurança ideal sem que haja detrimento para os de outras estaturas.

Veículos da série XK da Jaguar já possuem um sistema similar desde os modelos 2002. Nestes veículos o sistema de retenção identifica o peso do ocupante através de sensores nos assentos. Outro exemplo é a Audi com um sistema presente nos modelos A4, A5 e Q5. Este sistema possui sensores que identificam a posição do assento e dimensionam os parâmetros do sistema de retenção de acordo com este dado de entrada. Possui também um dispositivo mecânico que libera o deslocamento do cinto (limitador de carga) de acordo com violência do impacto ou peso do ocupante.

A tabela 4.3 apresenta os valores dos índices biomecânicos resultantes da otimização individual. Observa-se que a função objetivo demonstra uma melhora para o ocupante de estatura 5% para 83% do valor original enquanto que o ocupante de estatura 95% tem uma melhora relativamente pequena para 90% do valor original. Alguns veículos atuais possuem um sistema que adapta o sistema de retenção a algumas características físicas do ocupante, este sistema é denominado adaptativo. Neste trabalho considera-se esta condição de sistema otimizado para cada estatura individualmente como um sistema adaptativo, ou seja o veículo teria a capacidade de mudar os parâmetros do sistema de retenção de acordo com cada uma das três estaturas.

Tabela 4.3 Valores dos índices com os parâmetros do sistema de retenção otimizados individualmente.

Estatura do Ocupante	Máx FFC [kN]	HIC	Máx NIJ	VC [m/s]	Função Objetivo
5%	865	228	0,28	0,22	59
50%	5448	332	0,22	0,21	124
95%	5403	307	0,59	0,42	118

O gráfico 4.2 apresenta a sobreposição dos índices biomecânicos para os três casos. Os valores percentuais são em relação aos valores do ocupante 50%. Novamente o ocupante de estatura 5% tem o valor da função objetivo inferior aos outros, mas o índice de pescoço ainda está acima do valor de referência do ocupante 50%.

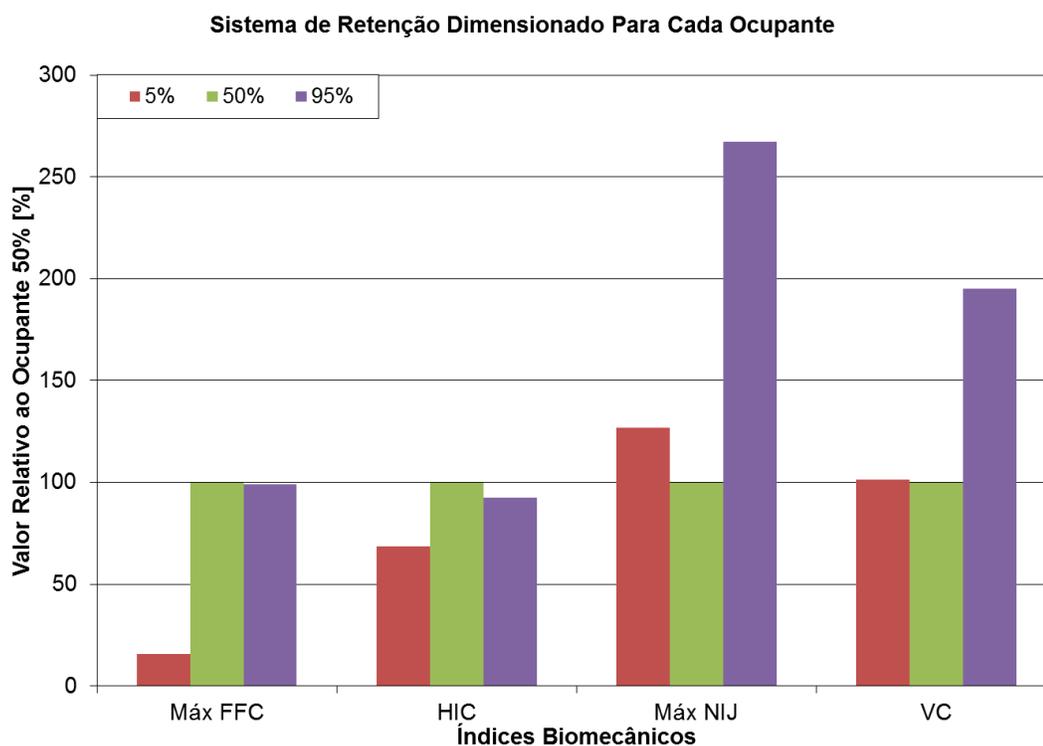


Gráfico 4.2– Resultados Biomecânicos (porcentual relativo ao tamanho 50%)

O gráfico 4.2 apresenta uma configuração parecida com a do gráfico 4.1, com resultados ainda elevados de pescoço para os *dummies* de estatura 5% e 95% e tórax para o *dummy* de estatura 95%. A tabela 4.4 apresenta a melhora dos índices biomecânicos para os ocupantes de tamanho 5% e 95% em relação à situação em que estão sujeitos ao sistema de retenção otimizado para o ocupante de estatura 50%.

Tabela 4.4 Melhora nos resultados Biomecânicos para sistema dimensionado individualmente.

Estatura do Ocupante	Máx FFC	HIC	Máx NIJ	VC
5%	29%	15%	9%	27%
95%	26%	-7%	-1%	-2%

Ocorre uma sensível melhora em todos os índices biomecânicos para o ocupante 5%, principalmente nos resultados de fêmur e tórax. O ocupante 95% apenas apresenta melhora no índice do fêmur, todos os outros resultados ficaram praticamente iguais. Este resultado pode ser

explicado pelo fato de o algoritmo de otimização identificar maior potencial de melhora apenas para este índice, enquanto que os outros índices, que apresentam um peso muito maior no processo de otimização, tem pouca sensibilidade com relação à variação dos parâmetros de entrada do sistema de retenção. Ou seja, existe um baixo potencial de melhora para o ocupante de tamanho 95% mesmo em um sistema dimensionado exclusivamente para ele. A variação da função objetivo de 131,1 para 118,3 demonstra que houve pequena melhora. A tabela 4.5 apresenta os valores obtidos para os sistemas de retenção para cada ocupante.

Tabela 4.5 Valores do sistema de retenção otimizado para cada tamanho de ocupante.

	Desarme Coluna de Direção (kN)	Limitador de Força (kN)	Load Filmspul (%)	Força do Pré Tensionador (kN)	Tempo de Disparo do Airbag (ms)	Tempo de Disparo do Pré Tensionador (ms)	Furo de Escape de Ar (Airbag) (mm)
5%	0,3	3,5	6,5	2,0	11,1	13,2	29
50%	2,3	3,0	0,8	2,8	11,0	16,4	27
95%	2,3	3,5	7,9	3,0	11,0	13,0	30

Para o ocupante 5% foi encontrada uma força de desarme da coluna de direção acentuadamente inferior em relação aos ocupantes de estatura 50% e 95%. Este resultado está relacionado com a proximidade maior ao volante.

A força do limitador de força é maior para os ocupantes 5% e 95%. No primeiro caso o resultado é explicado também pela menor distância em relação ao volante e no segundo devido à sua maior massa, exigindo maior força para restringir seu deslocamento.

O pré-tensionador apresenta uma variação esperada com valor de força limite crescente com a estatura do ocupante.

O *filmspul* não apresentou informações relevantes que possibilitem alguma interpretação ou correlação com os três tamanhos de ocupante. Pode-se apenas dizer que o deslocamento do cinto deve ser maior para os ocupantes de estatura 5% e 95%.

O tempo de disparo do *air-bag* foi igualmente para o mínimo (11 ms mínimo limitado pelo tempo de disparo dos equipamentos atuais) para todas as estaturas. Isto é um indicativo de que a redução no tempo de disparo pode resultar em índices biomecânicos melhores para todos os ocupantes.

O pré-tensionador tem também o tempo de disparo no limite inferior (13 ms) para os ocupantes de estatura 5% e 95%. No caso do ocupante 50% ele ficou em 16 ms. Isto indica que a redução no tempo de disparo pode resultar em melhora da condição dos ocupantes de estatura 5% e 95%.

O *vent-hole* do *air-bag* também chegou próximo ao limite superior de 30 mm para os dois ocupantes, enquanto que para o ocupante 50% ficou ligeiramente inferior em 27 mm. O resultado no limite superior para os ocupantes de estatura 5% e 95% indica que uma pressão menor no *air-bag* (relacionada ao maior escape de ar) pode ser importante para a melhora dos índices biomecânicos.

4.3 Pré-Crash - Offset no tempo de disparo de até 30 ms antes do impacto

Agora o sinal de aceleração sofre um *offset* de 30 ms. Neste caso significa que o programa de otimização pode trabalhar com o disparo do *air-bag* e do pré-tensionador em qualquer instante a partir de -30 ms do momento de impacto.

O objetivo é novamente um sistema de retenção dimensionado para o ocupante de estatura 50%. Os valores encontrados estão na tabela 4.8. Observa-se neste caso que o tempo de disparo do *air-bag* e pretensionador ficaram em 5.7 ms e -7.2 ms respectivamente. Isto significa que para o *airbag* o sinal do impacto precisa chegar em -5.3 ms (considerando 11 ms do recebimento do sinal pelo sensor até início do disparo) e para o pré tensionador -20.2 ms (considerando 13 ms do recebimento do sinal pelo sensor até início do disparo) antes do impacto.

Tabela 4.6 Resultados dos índices biomecânicos encontrados com offset no tempo de impacto.

Estatura do Ocupante	Máx FFC [kN]	HIC	Máx NIJ	VC [m/s]	Função Objetivo
5%	1168	201	0,25	0,21	55
50%	4489	271	0,26	0,17	102
95%	4141	253	0,59	0,37	95

Os resultados encontrados indicam que há uma sensível melhora nos índices biomecânicos de todos os ocupantes e não apenas da estatura 50%. Em relação ao ocupante 50% os ocupantes de tamanho 5% e 95% ainda apresentam alguns resultados piores, conforme gráfico 4.3.

Como no gráfico 4.1, observa-se que os resultados de pescoço (NIJ) e tórax (VC) para o ocupante 95% são bastante elevados em relação aos demais ocupantes. Porém quando comparados com a condição sem pré-crash a maioria dos índices biomecânicos dos três tamanhos melhoram sensivelmente como pode ser observado na tabela 4.7.

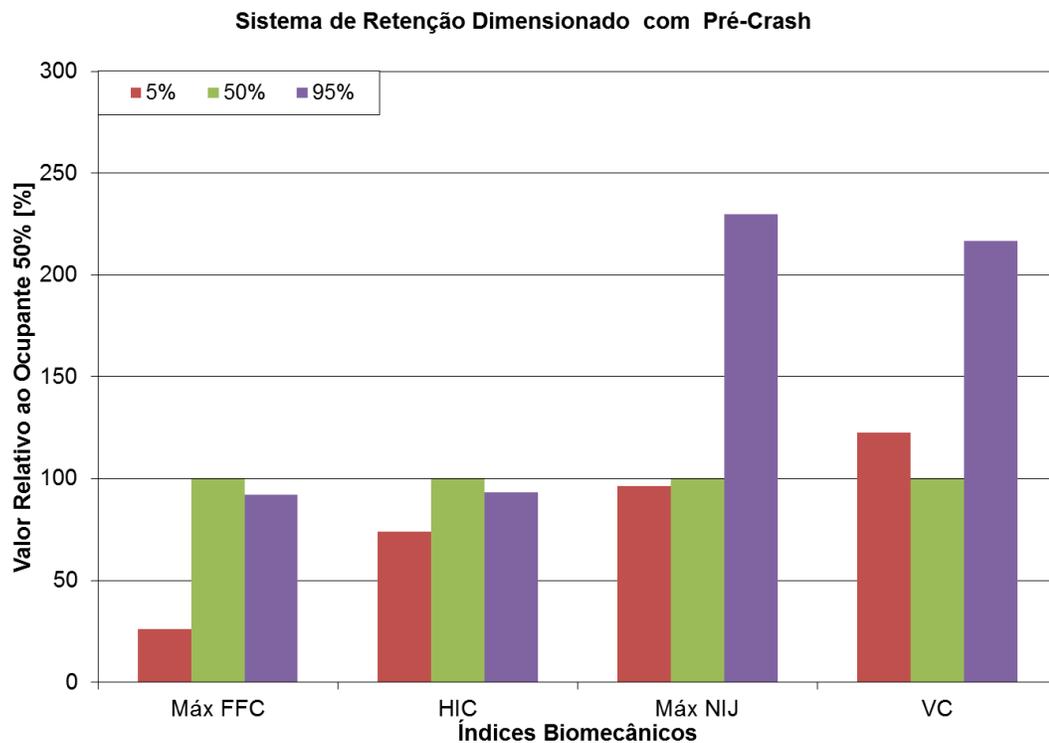


Gráfico 4.3– Resultados Biomecânicos (% em relação ao 50%)

Tabela 4.7 Melhora dos índices com sistema de retenção otimizado para estatura de 50% .

Estatura do Ocupante	Máx FFC	HIC	Máx NIJ	VC
5%	4%	25%	19%	29%
50%	18%	18%	-17%	20%
95%	43%	12%	-2%	9%

A tabela 4.7 mostra que houve melhora em todos os resultados como exceção dos índices de pescoço para os ocupantes 50% e 95%. Nos outros índices o ocupante 50% apresentou melhoras em torno de 20%. O ocupante 95% teve melhora de mais de 40% nos resultados de fêmur (FFC). O ocupante 5% foi o maior beneficiado destes resultados com melhorias de 20% a 30% para cabeça (HIC), pescoço (NJ) e tórax (VC). Comparando-se a melhora utilizando o sistema pré-crash com o dimensionamento individual (adaptativo) é notável o ganho do primeiro.

Conforme tabela 4.8, observam-se os valores dos parâmetros do sistema de retenção para o ocupante de estatura 50% na condição de adiantamento do tempo de disparo do *air-bag* e pré-tensionador. A comparação destes valores com os da tabela 4.5 mostra que os outros parâmetros apresentaram resultados intermediários.

Tabela 4.8 Parâmetros do sistema para *pre-crash*

Desarme Coluna de Direção (kN)	Limitador de Força (kN)	Load Filmspul (%)	Força do Pré Tensionador (kN)	Tempo de Disparo do Airbag (ms)	Tempo de Disparo do Pré Tensionador (ms)	Furo de Escape de Ar (Airbag) (mm)
1,8	3,0	0,6	2,7	5,7	-7,2	30

A figura 4.4 permite avaliar o potencial de melhora quando da utilização de um sistema *pre-crash*. O tempo utilizado na identificação do impacto e na preparação do sistema de retenção após o impacto, como ocorre nos sistemas de retenção convencionais, faz com que os ocupantes passem um tempo importante sem devida proteção. O sistema pré-crash permite a eliminação deste tempo com a ativação do sistema de retenção antes do impacto. Isto permite um ganho

considerável na eficiência da retenção do ocupante, possibilitando uma redução substancial no nível de ferimentos.



Figura 4.4 Comparativo pré-crash x método convencional em segurança passiva.

4.4 Comparativo Por Índice

O gráfico 4.5 apresenta o comparativo dos índices do fêmur (FFC) para os três ocupantes. O sistema adaptativo comparado ao sistema convencional apresenta vantagem significativa para os ocupantes de tamanhos 5% e 95%. O sistema pré-crash tem uma melhora significativa para os ocupantes de estatura 50% e 95% enquanto que a melhora para o de estatura 5% é inferior ao do sistema adaptativo. Porém, neste caso, os resultados para o fêmur já eram bem inferiores em relação aos outros tamanhos de ocupante.

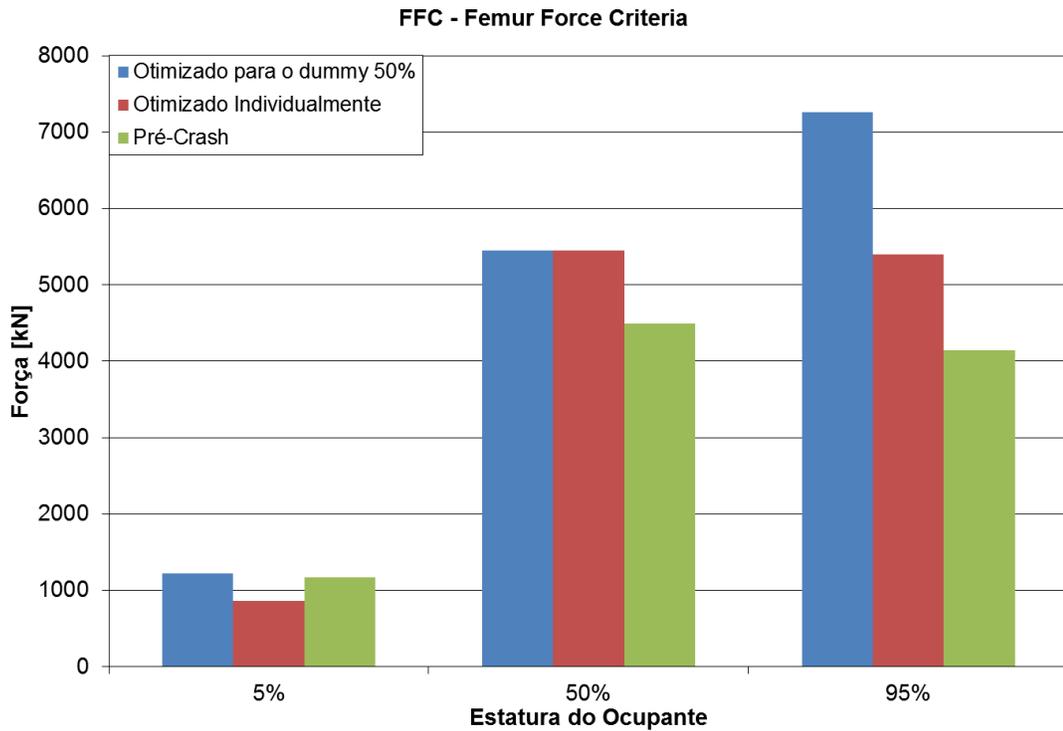


Gráfico 4.5– Comparativo para resultados do fêmur.

Os resultados de cabeça (HIC) para o pré-crash apresentam melhoria significativa para todos os ocupantes conforme observado no gráfico 4.6. O sistema adaptativo apresenta melhoria para o ocupante 5% apenas, enquanto que o ocupante 95% apresenta até mesmo uma leve piora no HIC.

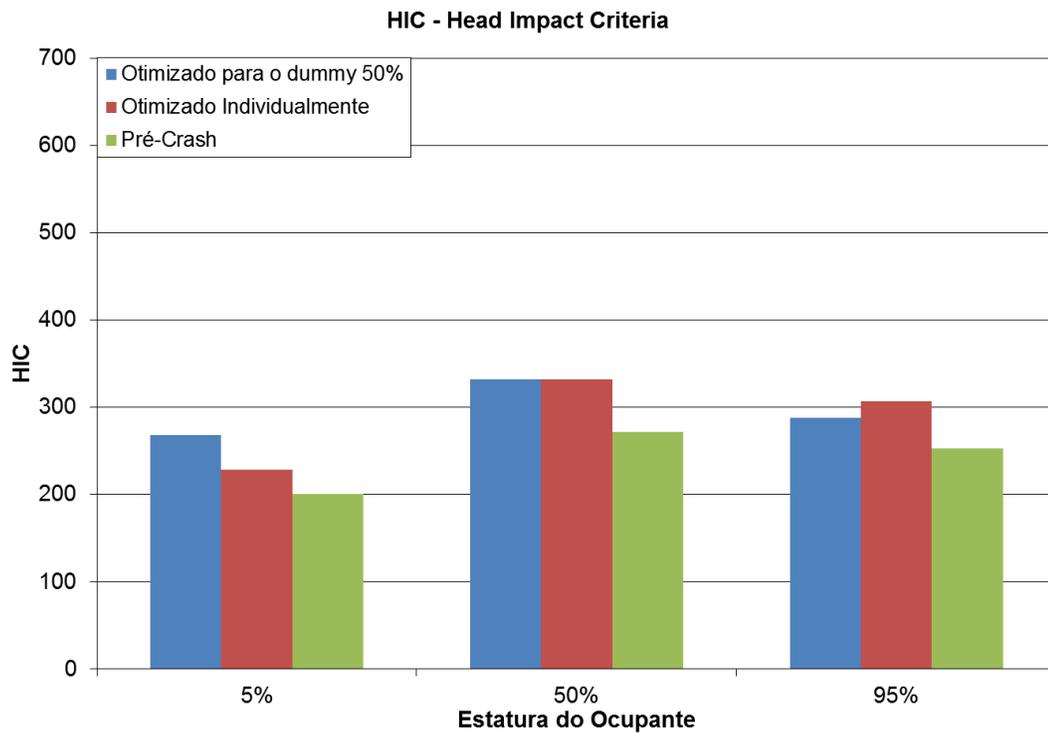


Gráfico 4.6– Comparativo para resultados da cabeça.

A análise do pescoço, no gráfico 4.7, mostra melhora tanto para o sistema adaptativo quanto para o pré-crash apenas para o ocupante de tamanho 5%. O ocupante 95% não apresenta mudança significativa nos resultados para nenhum dos três tipos de sistemas de retenção. O ocupante 50% apresenta até mesmo uma leve piora para o sistema *pre-crash*.

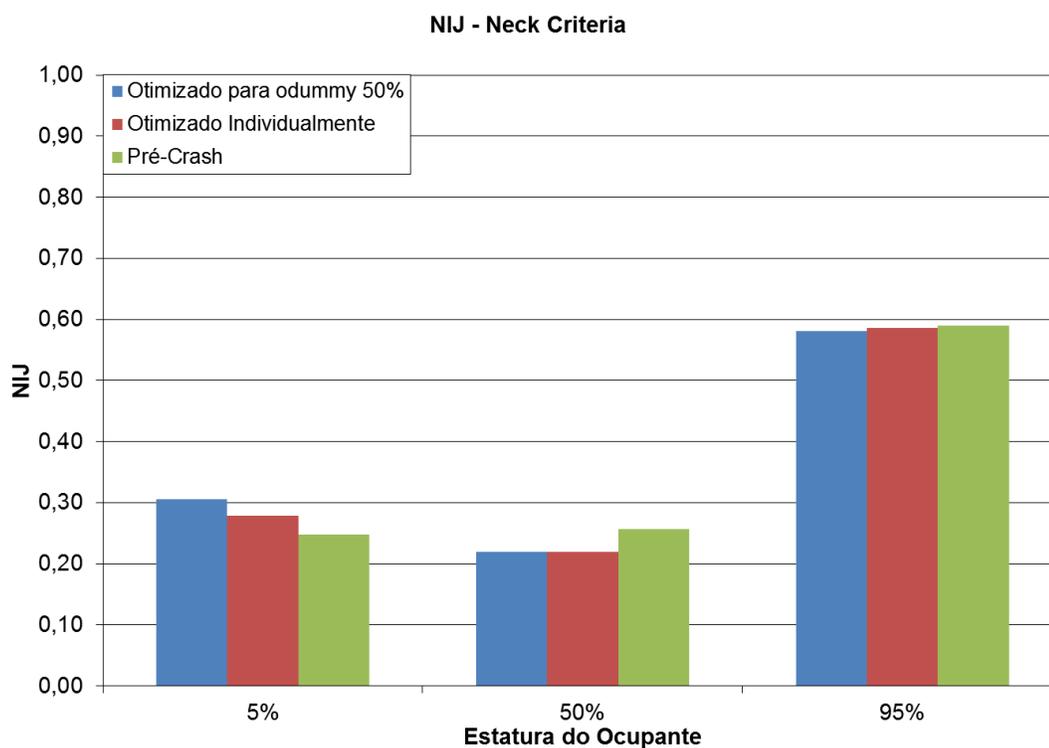


Gráfico 4.7 – Comparativo para resultados do pescoço.

Conforme o gráfico 4.8, os resultados para o tórax são melhores para o ocupante 5% tanto para o sistema adaptativo quanto para o pré-crash com desempenho praticamente equivalente. Para os ocupantes 50% e 95% o sistema pré-crash apresentou melhora significativa enquanto que o sistema adaptativo tem resultado praticamente equivalente no ocupante de estatura 95%.

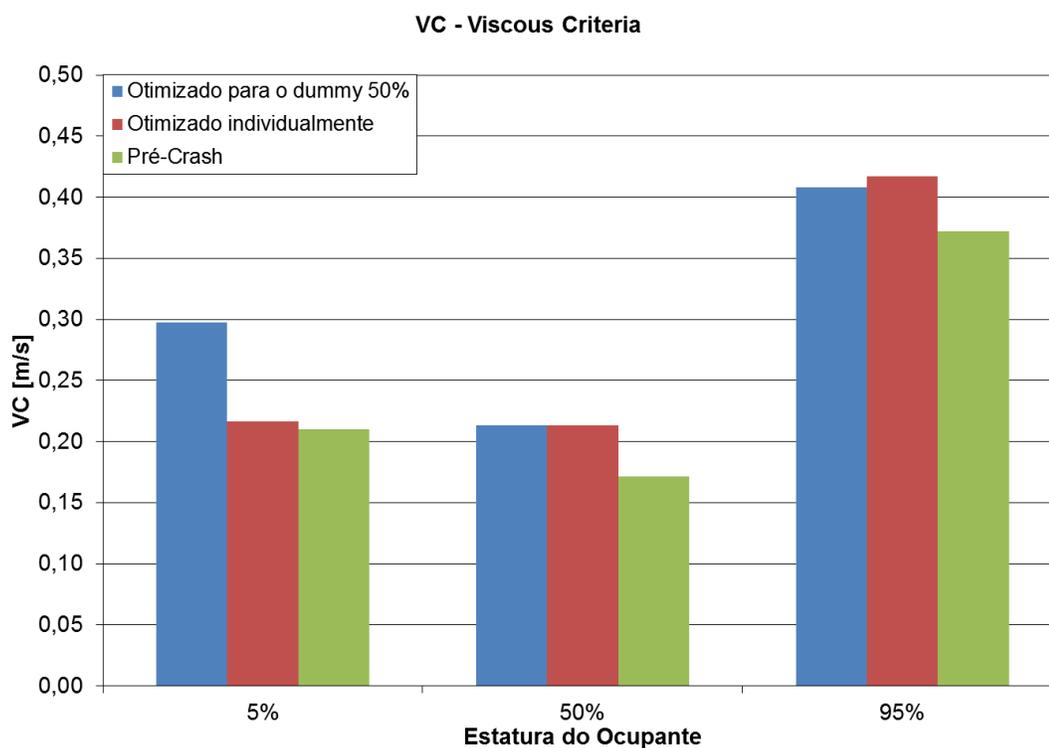


Gráfico 4.8– Comparativo para resultados do tórax.

Analisando os resultados em conjunto no gráfico 4.9, observa-se que tanto o uso do sistema de retenção pré-crash quanto do sistema adaptativo são eficientes para o ocupante 5%, que apresentou melhora em todos os índices biomecânicos analisados. Os ganhos mais significativos foram justamente nos índices mais críticos que envolvem a cabeça (HIC) e o tórax (VC).

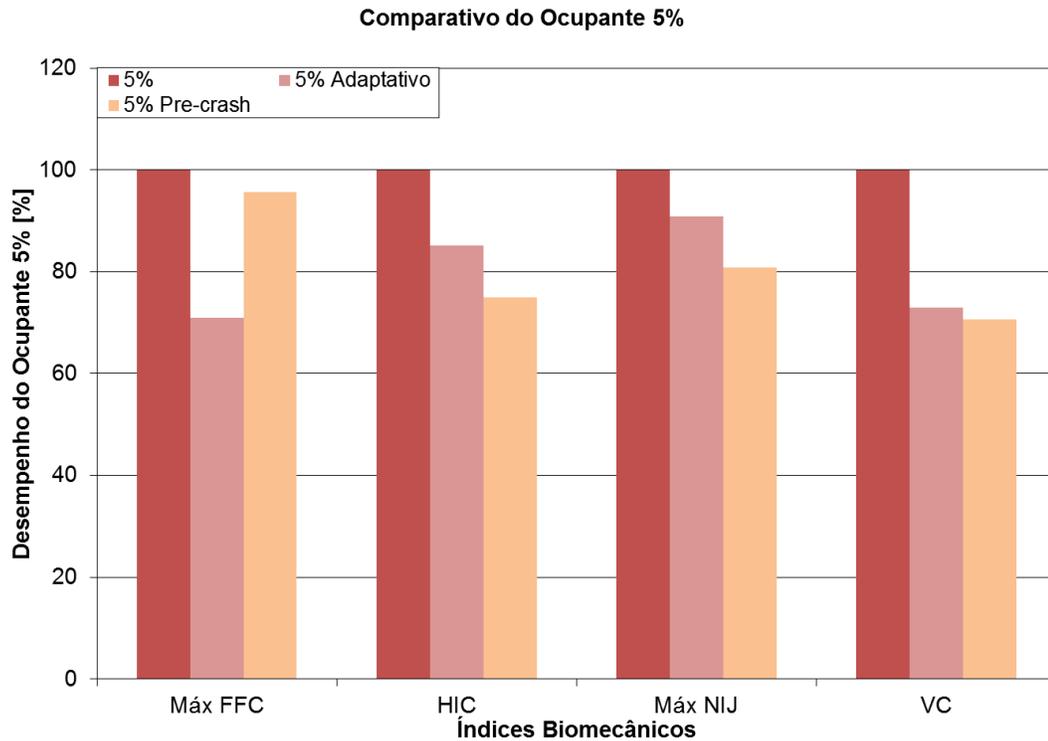


Gráfico 4.9 – Resumo dos resultados para o *dummy* 5%.

No caso do *dummy* 95% o gráfico 4.10 mostra que o sistema adaptativo apresenta a melhora apenas nos índices do fêmur enquanto que tórax e pescoço tiveram praticamente os mesmos resultados de um sistema convencional. O índice de cabeça apresentou até mesmo uma leve piora. O sistema pré-crash para o *dummy* de estatura 95%, mesmo utilizando valores que foram dimensionados para o ocupante 50%, demonstrou maior eficiência. Ocorre apenas uma leve piora no índice de pescoço, com melhora nos índices de cabeça, tórax e principalmente no fêmur (índice no qual é normalmente mais afetado).

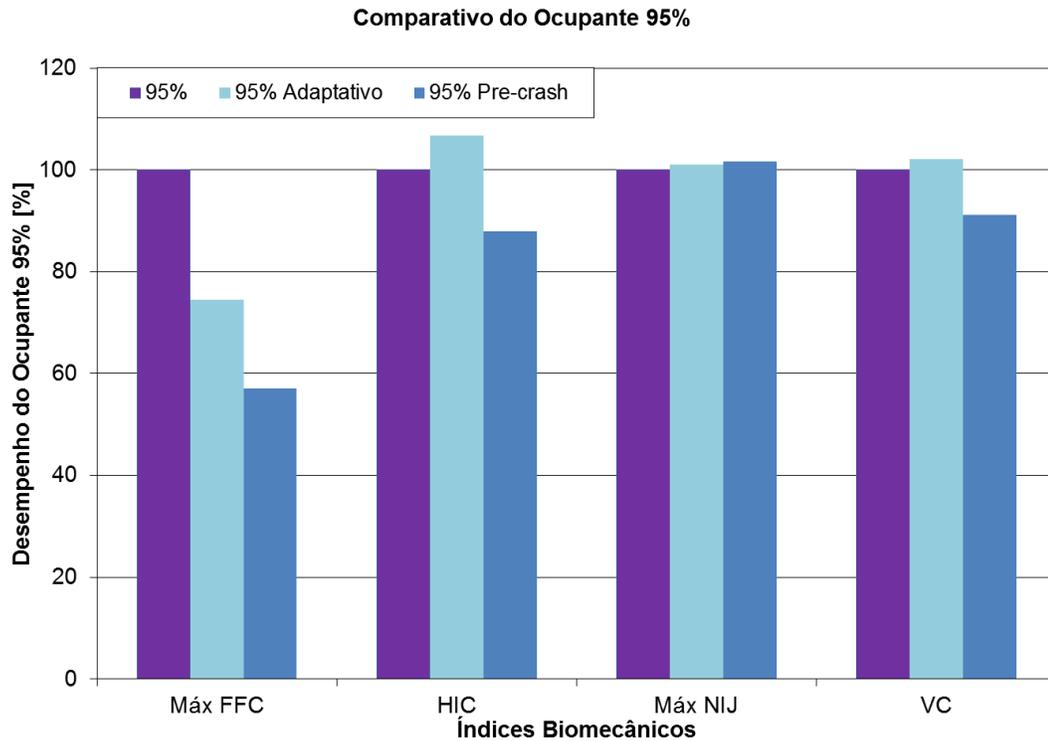


Gráfico 4.10 – Resumo dos resultados para o *dummy* 95%.

Outro aspecto que leva vantagem ao sistema pré-crash é que o ocupante 50% também apresentou melhora em três dos quatro índices conforme gráfico 4.11. Os valores para cabeça, tórax e fêmur apresentaram ganhos em torno de 20%. Apenas o índice do pescoço foi pior em 17%.

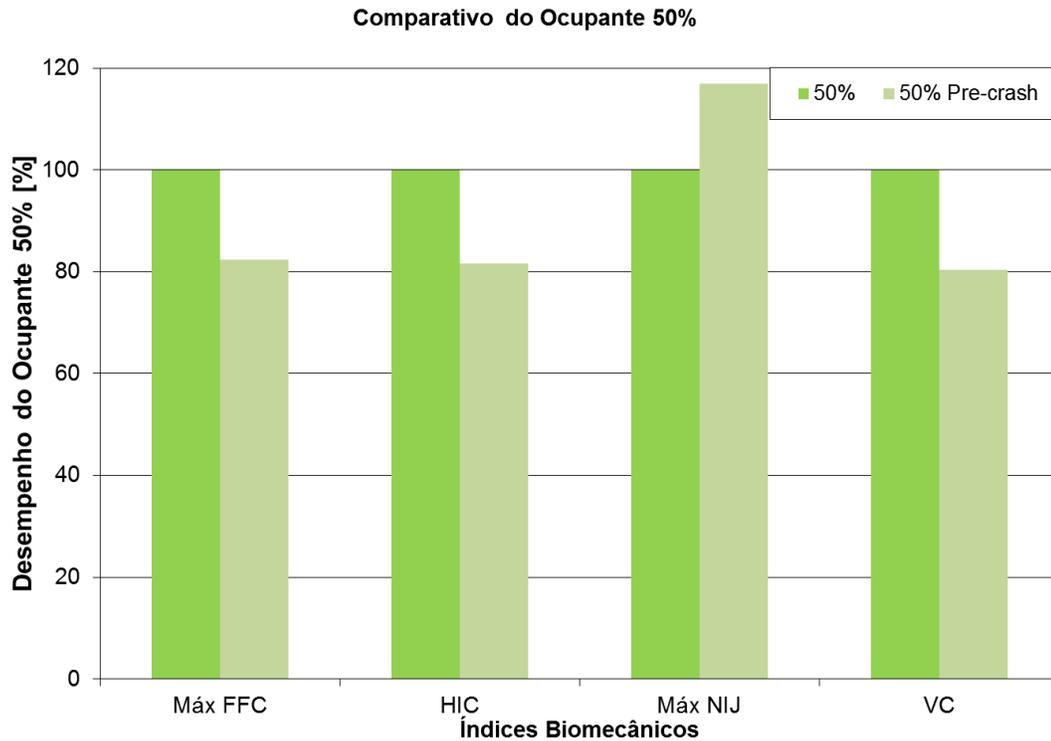


Gráfico 4.11 – Resumo dos resultados para o *dummy* 50%.

A piora que acontece em alguns índices ocorre devido à busca do programa de otimização que prioriza aqueles que têm maior importância (maior peso) ou quando há violação dos limites das variáveis. Uma perda em um índice de menor importância pode resultar em um ganho substancial em um índice importante como a cabeça e o tórax.

No caso do ocupante de estatura 95% a melhora acontece nos índices de fêmur (FFC) quando se otimiza o sistema de retenção (mesmo tendo menor peso na função objetivo), enquanto os outros valores tem uma leve piora. Neste caso ocorre que as variáveis de entrada tem uma influência (sensibilidade) menor nos demais índices da função objetivo (HIC, NIJ, VC). Neste caso a função objetivo teve apenas uma leve melhora.

5 CONCLUSÕES

O dimensionamento de um sistema de retenção considerando apenas um *dummy* 50% pode resultar em maior risco em caso de um impacto frontal para os ocupantes de outras estaturas, conforme evidenciado nos resultados encontrados. A melhora nos índices dos ocupantes das demais estaturas (representados pelos *dummies* 5% e 95%) pode ocorrer com a utilização de um sistema de retenção adaptativo, ou seja, que trabalhe com os parâmetros do sistema de retenção adequados para cada tamanho. Neste caso o veículo deve possuir algum dispositivo eletromecânico que possa identificar as características da pessoa que está conduzindo o veículo.

Porém uma melhora substancial na segurança de todos os ocupantes ocorre com a utilização de um sistema que identifique o impacto antes de ocorrer e possa acionar, quando necessário, o sistema de retenção. Este sistema conhecido como *pre-crash*, deve identificar através da velocidade relativa do veículo com o obstáculo a ocorrência e severidade de um impacto. Com estes dados o módulo eletrônico tem tempo para decidir sobre o acionamento ou não do sistema de retenção.

Comparando os dois sistemas, observa-se que o ocupante 5% apresenta melhora na maioria dos índices seja utilizando tanto o pré-crash quanto o sistema adaptativo. Porém o ocupante 95% mostra melhora nos índices de cabeça, tórax e fêmur para o sistema pré-crash enquanto que no sistema adaptativo ocorrem melhorias apenas no fêmur. O ocupante 50% também foi beneficiado pelo sistema pré-crash com melhora nos os índices de cabeça, tórax e fêmur com uma leve piora no índice do pescoço.

A melhora encontrada nos índices fica evidente para os ocupantes dos três tamanhos estudados. O adiantamento no tempo de disparo permite vencer as limitações do tempo que o *air-bag* e pré-tensionador precisam para iniciar o disparo efetivamente. Estes valores ficam em torno de 11 a 13 ms respectivamente após o início do impacto. Conforme observado nos resultados um tempo de disparo de 5.7 ms para o *air-bag* (ou acionamento a -5.3 ms) e -7.2 ms (acionamento a -20.2 ms) são os principais responsáveis pela melhora nos índices biomecânicos.

Os resultados e demonstrações presentes neste trabalho permitem chegar à conclusão que o adiantamento do tempo de disparo podem realmente melhorar os índices biomecânicos, porém é importante ressaltar que estes resultados são comparativos e servem para mostrar uma tendência.

Os valores absolutos apresentados podem variar conforme o projeto e os parâmetros de entrada utilizados neste trabalho não devem ser considerados para efeito de projeto.

Diversas dificuldades adicionais devem ser superadas na implantação de tal sistema. Os programas atualmente podem verificar o grau de severidade do impacto e até analisar a posição do carro em relação ao obstáculo, decidindo a partir da velocidade relativa, pelo modo de acionamento do sistema de retenção ou se o mesmo deve realmente ser acionado (evitando o disparo desnecessário em baixas velocidades). Porém não é possível identificar antecipadamente a natureza do obstáculo. Uma parede de concreto ou uma grande caixa de papelão tem efeitos completamente diferentes na natureza do impacto e só podem ser avaliados após o contato inicial. Deve-se verificar a viabilidade técnica de um sistema de retenção que seja reversível e assim evite que os equipamentos tenham que ser trocados desnecessariamente. Um disparo em movimento pode até mesmo causar a perda de controle do ocupante no caso de acionamento desnecessário do *air-bag*.

Estudos experimentais e considerando veículos de outras classes são recomendados. Do mesmo modo recomenda-se para trabalhos futuros o mesmo estudo de sistema de retenção para o passageiro dianteiro direito. Outros estudos importantes são a avaliação do sistema pré-crash em casos de impacto frontal com barreira deformável e sobreposição 40% (por exemplo, conforme norma ECE R94), impacto lateral com barreira deformável (ECE R95) e lateral contra poste. Nos dois últimos casos, devido à menor proteção na lateral do veículo, um disparo antecipado do sistema de retenção pode ser bastante útil.

A combinação do sistema pré-crash com um sistema adaptativo também é uma recomendação importante para um próximo trabalho. Além da estatura, é interessante também estudar outras características físicas dos ocupantes. Em cada faixa etária existe uma força limite que o sistema de retenção pode atuar. Pessoas com mais idade (acima de 60 anos), não admitem uma compressão muito maior que 2 kN no tórax devido à menor resistência dos ossos. Há casos de pessoas com baixa estatura e peso excessivo etc. Um sistema que identifique estas diferentes condições pode atuar de maneira mais particular e eficiente.

Adicionalmente a combinação de um sistema pré-crash de segurança passiva, como estudado neste trabalho, combinado a um sistema pré-crash de segurança ativa (trabalhando antes que o acidente ocorra, acionando os freios e o controle de estabilidade evitando assim o descontrole do veículo) é um campo de estudo bastante amplo. Existe, neste caso, um potencial

de grande melhora na segurança dos ocupantes de carros de passeio. Porém, independentemente da eficiência dos sistemas de proteção desenvolvidos, é fundamental que os motoristas ajam com prudência nas vias, fazendo com que a necessidade do uso de tais sistemas de segurança ocorra apenas em casos extremos e realmente imprevistos.

6 REFERÊNCIAS

BURG, Heinz; MOSER, Andreas. **Handbuch Verkehrsunfall-rekonstruktion. Unfallaufnahme – Fahrdynamik – Simulation.** © Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007.cap.18, p.521-530.

MLEKUSCH, B; FREYBURGER, A. **Airbag-Öffnungsverhalten: Simulationsmethoden und Versuchstechnik.** Audi AG – Ingolstadt 27.10.2005. 2p.

GONTER, Markonter. **Steuerkonzepte für Adapative Airbagsysteme zur insassen – und unfallspezifischen Optimierung des Insassenschutzes.** Rödinghausen, PDF Vesion Intranet Volkswagen. Verlagsvesion Berlin: Pro BUSINESS 2007. 143p.

GONTER, Mark; ZOBEL, Dr. Robert; SPIES, Udo. **Potential of Adaptive Restraints in Frontal Collisions.** 7th International Symposium Airbag 2004, 29.11-01.12.2004, Karlsruhe, Germany. 18p.

HAHN, Daniel; MAMEDNIYAZOVA, Natali; ADOMEIT, Heinz-Dieter. **Weitere Sicherheitspotentiale in Insassenschutzsystemen bei Aktivierung durch Pre-Crash-Informationen. Further Potentials for Occupant Safety System Activated by Pre-Crash-Information.** Automobiltechnik und Fahrzeugsicherheit, Berlin VDI-Berichte Nr. 2013, 2007. p.171-188.

EISENACH, Alexander; UNGER, Martin; YUXUE, Qin; SCHINDLER Volker; HÄNSCHKE, Axel. **Mitigation of Real world Injury Risk in Frontal Impact. Minderung der Unfallfolgen bei Frontalzusammenstößen.** VDI-Berichte Nr. 2013, 2007. p.335-346.

SCHWARTZ, Thomas; BUSCH, Sebastian; ZOBEL Robert. **Influence of Deceleration Pulse on Driver Injury Levels in Vehicle-to-Vehicle Collisions.** VOLKSWAGEN AG, Accident Research, Wolfsburg, Germany. Imech Conference on Vehicle Safety 28.-29.05.2002 London. 8p.

VERSEN, Christian B.. **Computermodele des Menschen zur Berechnung von Insassenbelastungen beim Fahrzeugaufprall.** Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal Fachbereich 14, 1999. 219p.

NAHUM, Alan M; MELVIN, John W.; **Accidental Injury, Biomechanics and Prevention.** University of California at San Diego School of Medicine La Jolla, CA 92093 USA. Springer Science+ Business Media, Inc, 2002. 637p

KRAMER, Florian Kramer. **Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Biomechanik – Simulation – Sicherheit im Entwicklungsprozess.** © Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006. 429p.

SCHINDLER, Volker; SIEVERS, Immo. **Forschung für das Auto von Morgen.AusTradition entsteht Zukunft.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 387p.

ECE R33 – **Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Behaviour of the Structure of the Impacted Vehicle in a Head-on Collision.** Genebra, 2009. 23p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15300-1** – Veículos rodoviários automotores - Proteção ao ocupante - Ensaios de impacto frontal Parte 1: Requisitos de desempenho. 2013. 15p.

TNO Automotive . **Madymo V5.4 Theory Manual.** 1999.

CARHS. **CarHS training 2010.** www.carhs.de. 03-2010.

AUTOLIV. **User Guide for the Simulation Models of Autoliv Retractors. Retractor Model Release Version: V2.2.1.** Autoliv B.V. & Co. KG Otto-Hahn-Straße 4, D-25337 Elmshorn, 2010. 25p.

AUTOLIV. **Validation Report for the AutolivR27LL Retractor Simulation Model.** Autoliv B.V. & Co. KG Otto-Hahn-Straße 4, D-25337 Elmshorn, 2010. 14p.

WOHLLEBE, Thomas; GONTER, Mark; MEINECKE, Marc-Michael. **Potential of Pre-Crash Restraints in Frontal Collisions.** Volkswagen AG., 38436 Wolfsburg, Germany. 2006. 15p.

MERZ, Uwe , BACHMAN, Roland; BOGENRIEDER, Ralf; WAGNER, Alfred. **Pre-Sense. Bindeglied Zwischen Umfeldsensorik Und Akutem Insassenschutz.** 2007. DaimlerChrysler AG, Sindelfingen. VDI-Berichte Nr. 2013. p81-92.

HAHN, Dipl.-Ing. Wolfgang. **Die Entwicklung der Fahrzeugsicherheit in Europa. Evolution of Vehicle Safety in Europe.** Adam Opel GmbH, Rüsselsheim. VDI-Berichte Nr. 2013, 2007. p.35-44.

HERSKOWITZ, José I. **Advances in Structural Optimization.** Kluwer Academic Publishers, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands, 1995. 496p.

CHRISTENSEN, Peter W.; KLARBRING, Anders. **An Introduction to Structural Optimization.** Springer Science + Business Media B.V., 2009. 211p.

RESTA, Giuseppe. **Crashworthiness Simulations and Test Practice, Solution for Crash and Safety.** Workshop São Paulo, Março 2012.

RUST, Wilhelm. **Nichtlineare Finit-Elemente-Berechnungen.** © Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009. 293p.

BAST, D. Cichos; VOGEL, D. De ; OTTO, M.; SCHAAR, O. ; ZÖLSCH S., National Instruments, in cooperation with Task Force ISO TS 13499 (ISO-MME). **Crash Analysis Criteria Description. Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit.** Bundesanstalt für Strassenwesen, Bunderstrasse 53, D-51427 Bergisch Gladbach, 2006.

MEYWERK, Martin. **CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik.** Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007. 357p.

POLES, Silvia. **MOGA-II, An improved Multi-Objective Genetic Algorithm.** ESTECO, Trieste, 2003. 16p.

DÜCKER, Mitko. **Berechnung von Beschleunigungsverläufen und Abgleich mit Versuchsdaten im Gesamtfahrzeugcrash.** Diplomarbeit. 2005. Technische Fachhochschule Berlin Studiengang Maschinenbau / Konstruktion. 86p.

MORASSI, Paulo R.; AKIOSSI, Alberto; BLINDER, Luciano; TODESCATT, Daniel; ROSSI, Fabio G.. **Efetividade de um Sistema de Retenção Veicular Considerando Diferentes Padrões Antropométricos Humanos.** Paper SAE 2010-36-0220P, 2010. 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes> (consulta 06/2012).

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **RESOLUÇÃO Nº 221- Requisitos de proteção aos ocupantes e integridade do sistema de combustível decorrente de impacto nos veículos.** 2007. 2p.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION; **FMVSS 208 – Occupant Crash Protection - Federal Motor Vehicle Safety Standards.**

ESTECO. **modeFRONTIER™ 4 User Manual.** 404p.

RIGONI, Enrico, POLES, Silvia. **NBI and MOGA-II, two complementary algorithms for Multi-Objective optimizations.** Dagstuhl Seminar Proceedings 04461 Practical Approaches to Multi-Objective Optimization <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2005/272> Area Science Park, Padriciano 99, 34012 Trieste, Italy. 22p.

MORELLO, Lorenzo; ROSSINI, Rosti; PIA, Giuseppe; TONOLI, Andrea. **TheAutomotiveBody - Volume I: Components Design.** Springer Science + Business Media B.V. 2011. 668p.

MORELLO, Lorenzo; ROSSINI, ROSTI; PIA, Giuseppe; TONOLI, Andrea. **The Automotive Body - Volume II: System Design.** Springer Science + Business Media B.V. 2011. 564p.

SARAMAGO, Sezimária F. Pereira. **Algoritmos Genéticos: a otimização aplicando a teoria da evolução.** Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

MASTINU, G.; GOBBI, M.; MIANO, C.. **Optimal Design of Complex Mechanical Systems With Applications to Vehicle Engineering.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006. 359p.

ANEXO A – PESOS PARA OS ÍNDICES BIOMECÂNICOS

(EISENACH, 2007)

Parte do Corpo	Critério de Avaliação	Valores Limite			Fonte	Fator Peso	Estratégia de Otimização Através da Probabilidade de Ferimento
		Inferior	Superior	Unidade			
Cabeça	HIC ₁₅	650,0	100,0	-	Euro-NCAP	2/9	Otim. Probabilidade de Ferimento
	Aceleração 3ms máx.	72,0	88,0	g	Euro-NCAP	2/9	Limite inferior
Pescoço	Força de Tração	2,7	3,3	kN	Euro-NCAP	1/36	Limite inferior
	Força de Cisalhamento (negativo)	1,9	3,1	kN	Euro-NCAP	1/36	Limite inferior
	Força de Cisalhamento (positivo)	1,9	3,1	kN	Euro-NCAP	1/36	Limite inferior
	Momento (extensão)	42,0	57,0	Nm	Euro-NCAP	1/36	Limite inferior
Tronco	Aceleração 3ms máx.	49,0	60,0	g	FMVSS208	2/27	Otim. Probabilidade de Ferimento
	Deflexão no Tórax	22,0	50,0	mm	Euro-NCAP	2/27	Otim. Probabilidade de Ferimento
	Critério Viscoso	0,5	1,0	m/s	Euro-NCAP	2/27	Limite inferior
Pélvis	Aceleração 3ms máx.	65,0	80,0	g	Kramer	1/6	Limite inferior
Femur	Força axial, esquerdo (compressão)	3,8	9,07	kN	Euro-NCAP	1/108	Limite inferior
	Força axial, direito (compressão)	3,8	9,07	kN	Euro-NCAP	1/108	Limite inferior
Joelho	deslocamento (esquerdo)	6,0	15,0	mm	Euro-NCAP	1/108	Limite inferior
	deslocamento (direito)	6,0	15,0	mm	Euro-NCAP	1/108	Limite inferior
Tíbia	Índice Tíbia esquerda superior	0,4	1,3	-	Euro-NCAP	1/216	Limite inferior
	Índice Tíbia direita superior	0,4	1,3	-	Euro-NCAP	1/216	Limite inferior
	Índice Tíbia esquerda inferior	0,4	1,3	-	Euro-NCAP	1/216	Limite inferior
	Índice Tíbia direita inferior	0,4	1,3	-	Euro-NCAP	1/216	Limite inferior

Tabela 3.5: Apresentação dos limites de carregamento considerados.

ANEXO B – ÍNDICE DE ACIDENTES E ÁREAS AFETADAS DOS OCUPANTES

(SCHINDLER, 2008)

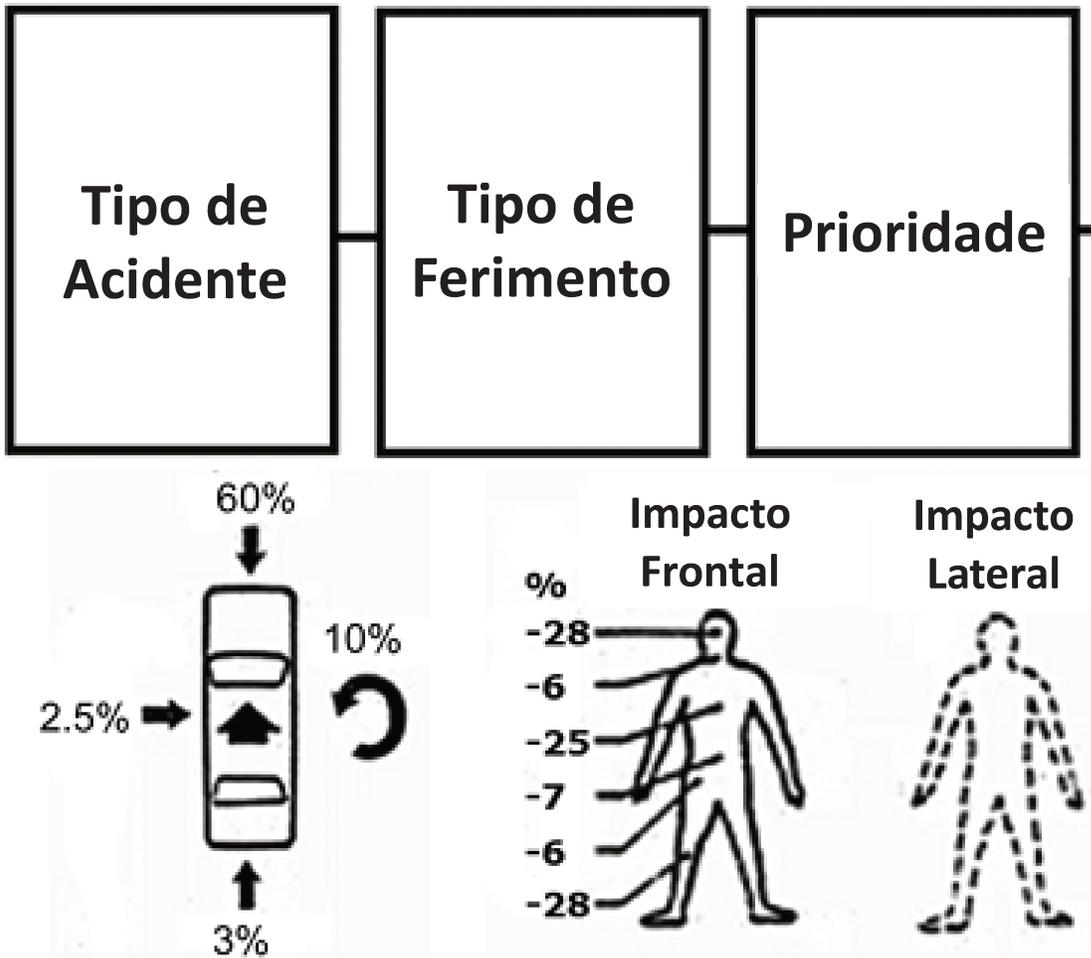


Figura 13.2: Representação esquemática da análise de acidente

ANEXO C – EXEMPLO SEGURANÇA ATIVA

(SCHINDLER, 2008)

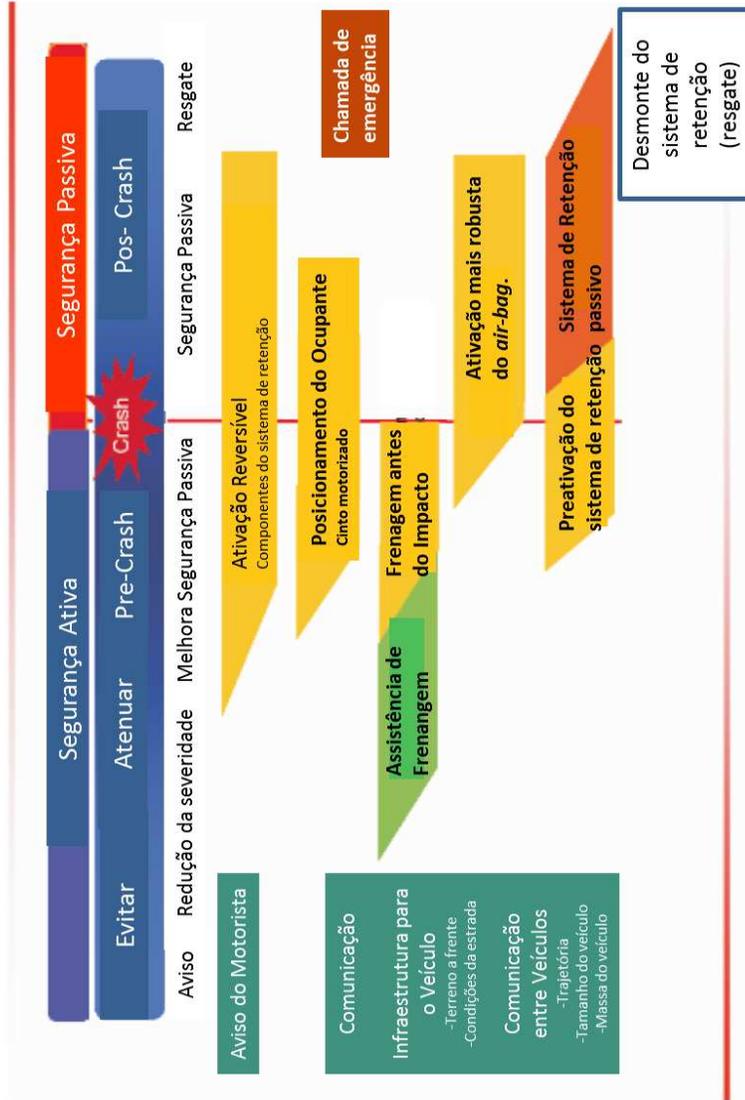


Figura 22 Intervalo de tempo entre a condução normal e as medidas de resgate após o acidente.

ANEXO D – DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES BIOMECÂNICOS RELEVANTES

(MORELO, 2011)

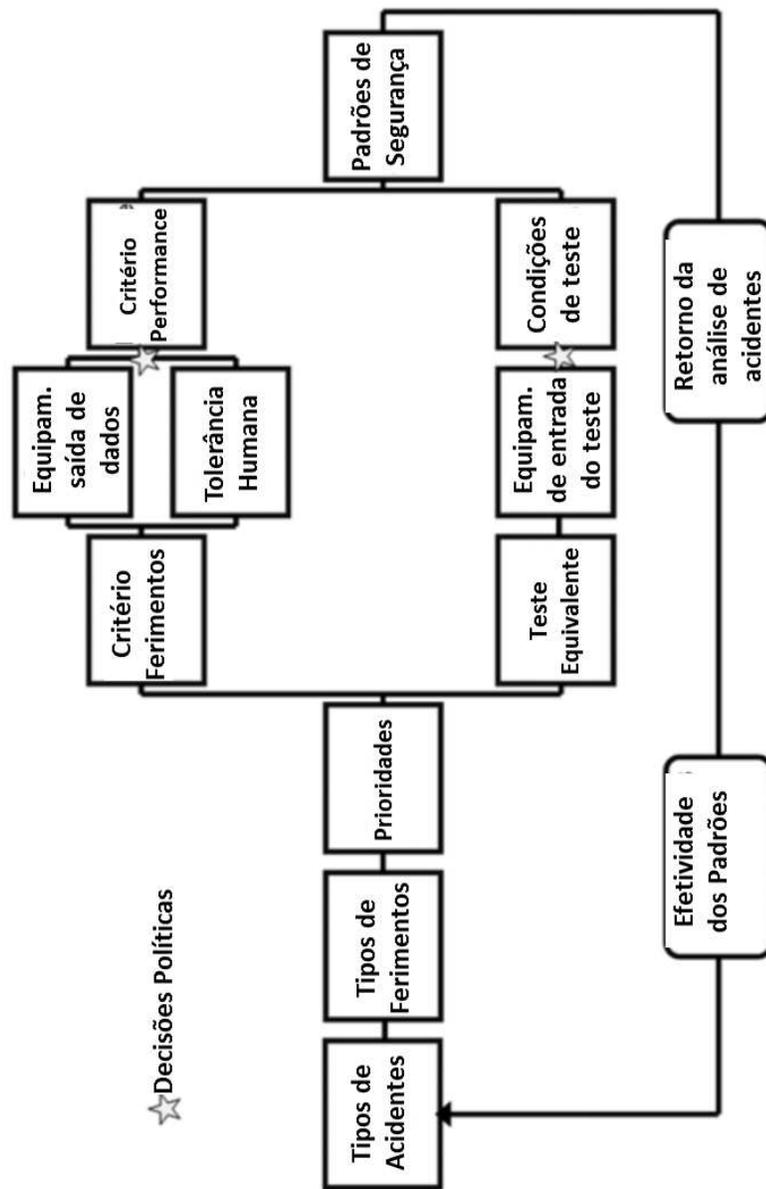


Figura 13.1 Representação esquemática da análise biomecânica.

ANEXO E – TOLERÂNCIA PARA CABEÇA: NÍVEL DE ACELERAÇÃO/ DURAÇÃO

(MORELO, 2011)

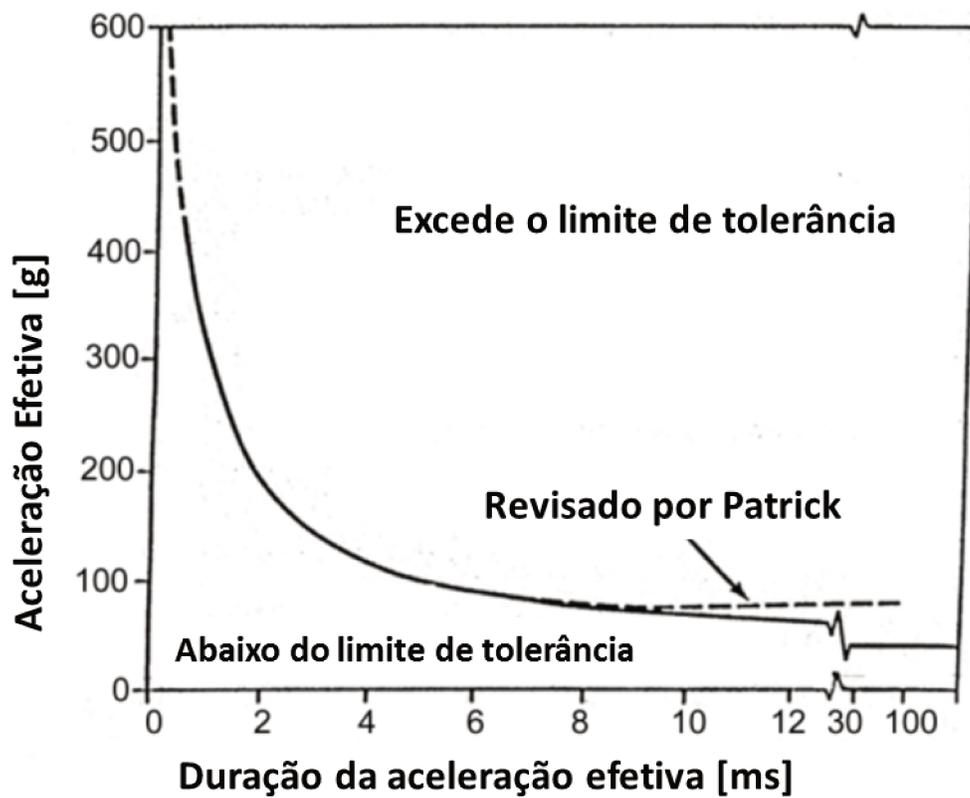


Fig. 13.7 Critério de Ferimento para a cabeça.

ANEXO F – CARGAS NO PESCOÇO E CRITÉRIO FMVSS 208

(MORELO, 2011)

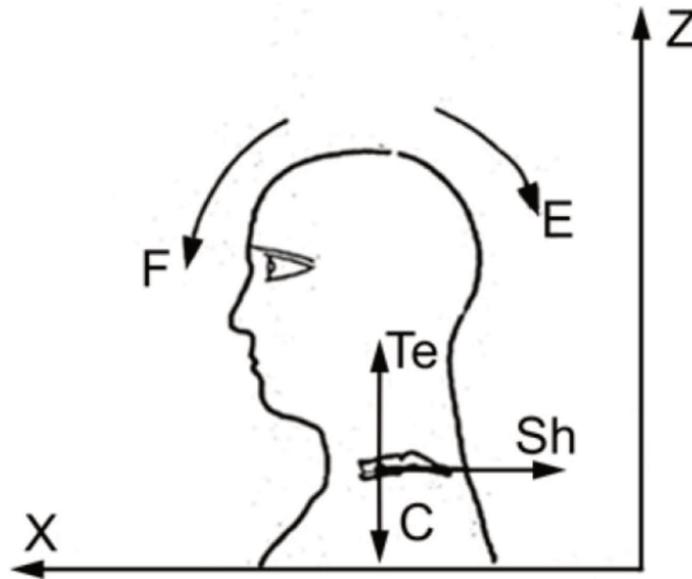


Fig. 13.9 Critério de ferimento para o pescoço.

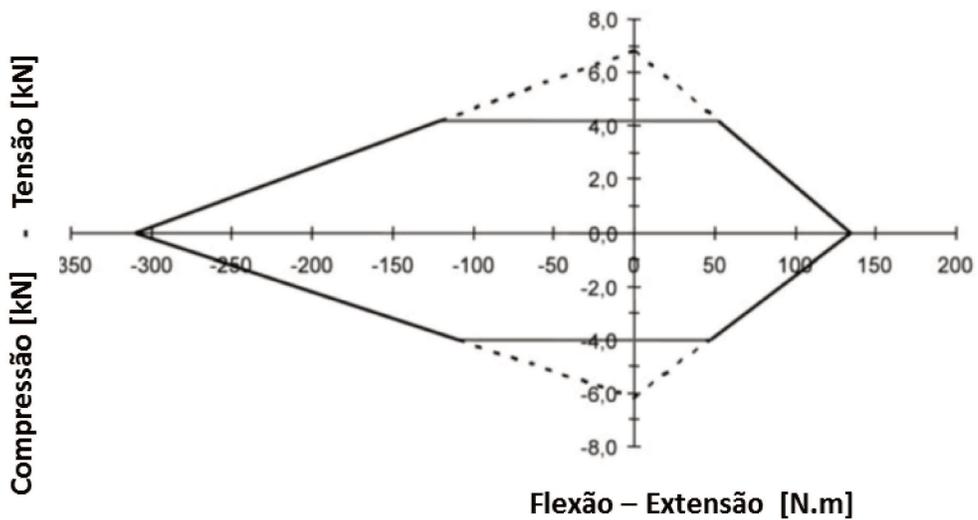


Fig. 3.70 Região aceitável para do critério de segurança para o pescoço de acordo com a FMVSS208 (exemplo para o critério de segurança, HYBRID III 50% - Dummy)

ANEXO G - CURVA DE TOLERÂNCIA PARA O TÓRAX

(MORELO, 2011)

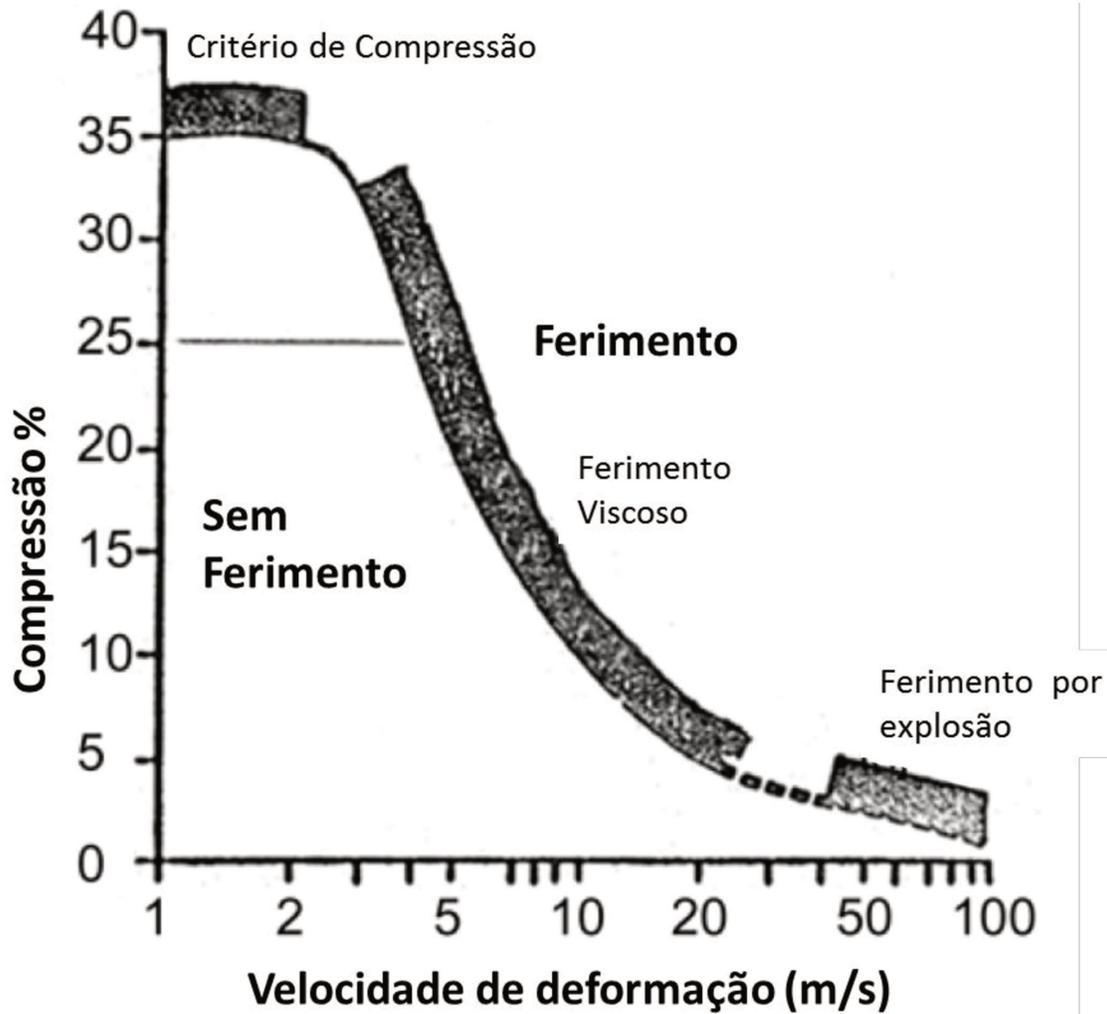


Fig. 13.14. Critério de ferimento para o tórax.

(MORELO, 2011)

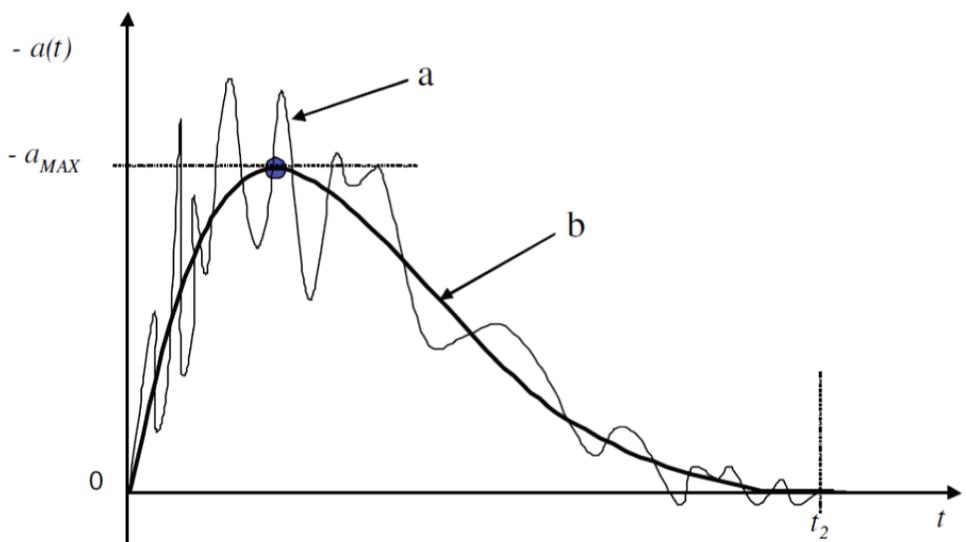


Fig. 13.19. Comportamento qualitativo da aceleração medida no trilho do banco durante um impacto frontal contra barreira. Medição experimental a); Curva semi-empírica de Mc Millan b).

ANEXO I – DIAGRAMA VELOCIDADE/TEMPO NO IMPACTO

(MORELO, 2011)

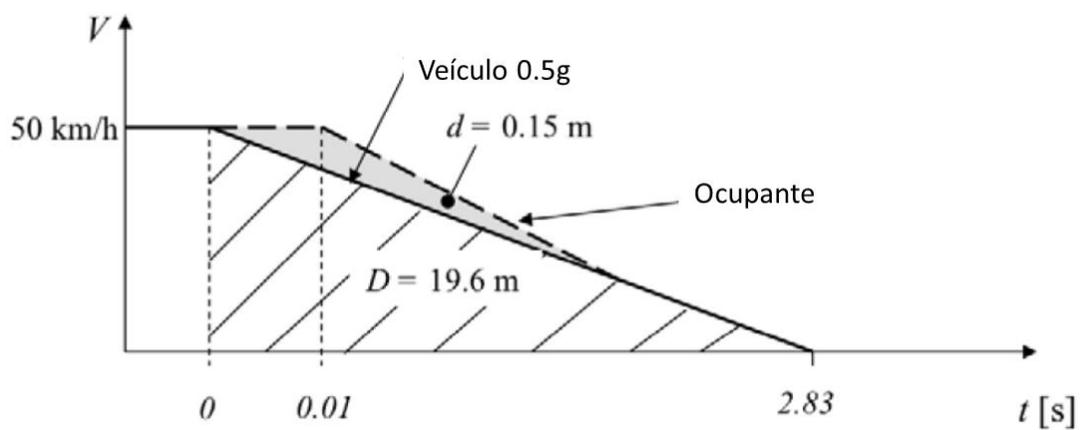


Fig. 13.22. Diagrama velocidade por tempo durante uma frenagem.

ANEXO J – DUMMY HIII 50%

(MORELO, 2011)

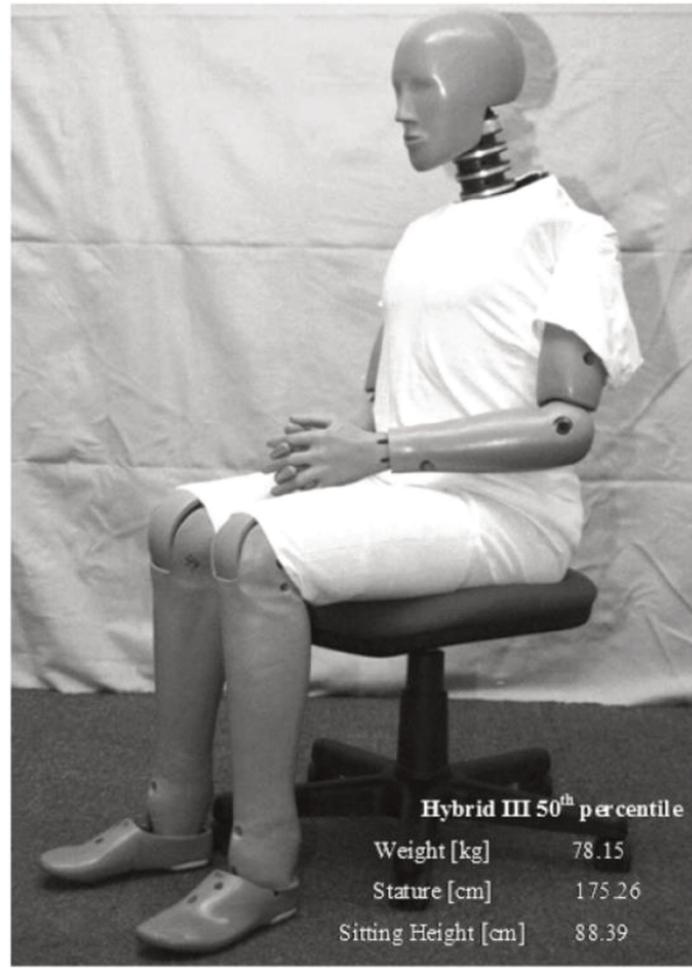


Fig. 13.64. *Dummy para impacto frontal: Híbrido III 50 percentil.*

(MORELO, 2011)

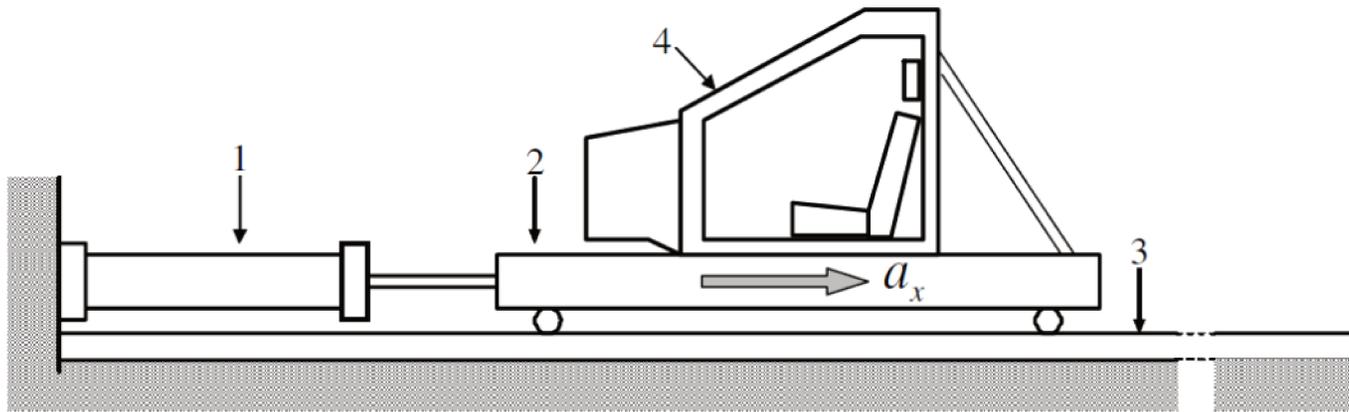


Fig. 13.71 Esquema de deslocamento de um HYGE. 1) pistão pneumático/hidráulico; 2) Vagão; 3) Trilhos; 4) elemento a ser testado.

ANEXO L – REGIÕES DO CORPO AFETADAS EM IMPACTO FRONTAL

(KRAMER 2006)

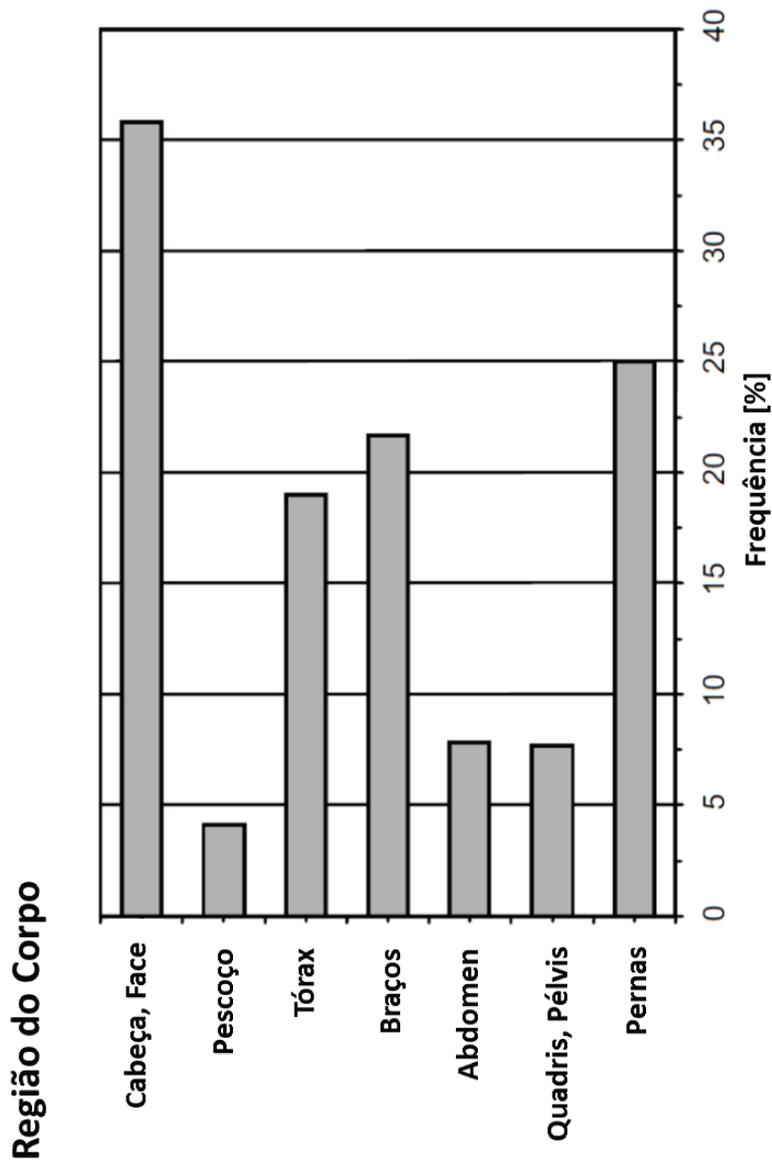
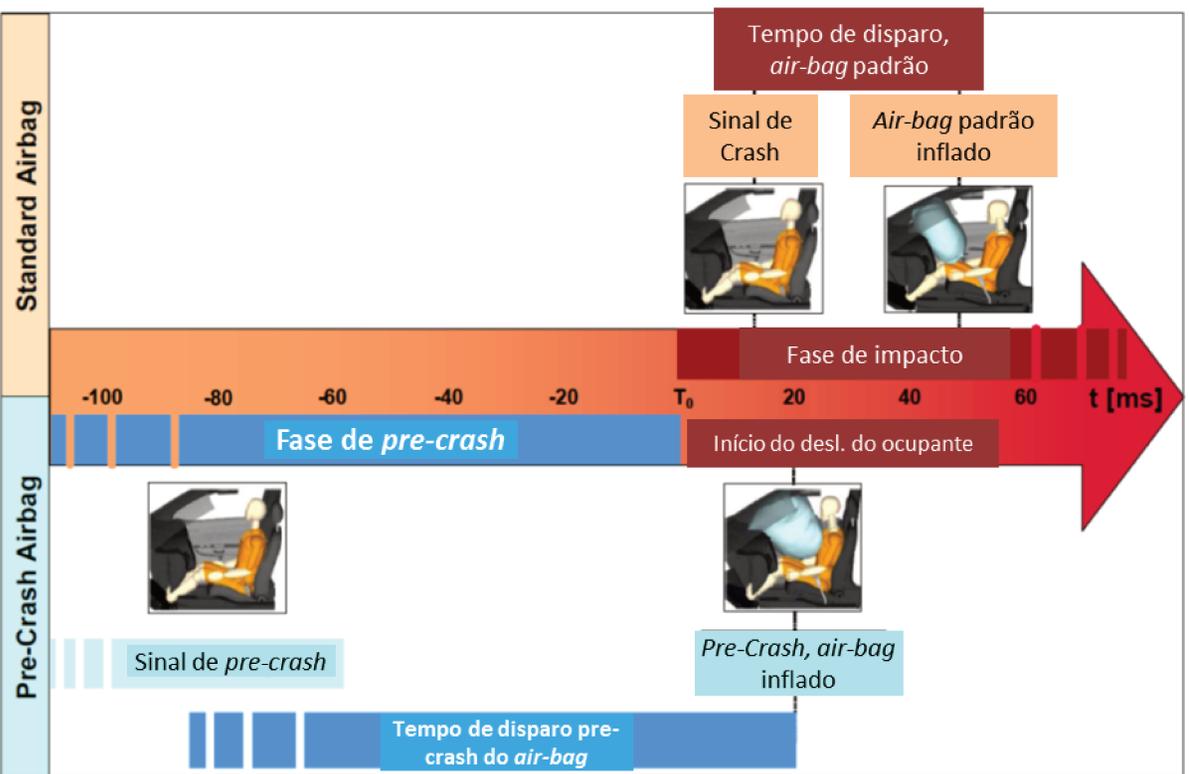


Fig. 3.2: Ferimentos específicos de partes do corpo em um ocupante de veículo de passeio numa colisão frontal.

ANEXO M – DISPARO DO AIR-BAG COM E SEM PRE-CRASH



(WOHLLEBE, 2006)

Figura 5: Disparo do *air-bag* no *pre-crash* comparado com o *air-bag* padrão.

ANEXO N – CRITÉRIOS PARA ÍNDICES BIOMECÂNICOS

FMVSS208

(KRAMER 2006)

Tab. 3.6: Critérios de segurança e nível de acordo com a FMVSS208 relacionada ao tamanho do *dummy* e à constelação de testes.

Padrão de Segurança	FMVSS 208 antiga	FMVSS 208 – Regra final					
		HIII 50%	HIII 50%			6 anos	3 anos
Tamanho do <i>Dummy</i>	HIII 50%	Em posição Dinâmico	Em posição estático	Fora de posição estático			
Constelação de testes							
Critérios de segurança							
Cabeça HIC	1000	700	700	700	700	570	390
Pescoço Nij	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Pescoço Fz força de tração [kN]	-	6806	4287	3880	2800	2120	1460
Pescoço Fz força de compressão [kN]	-	6160	3880	3880	2800	2120	1460
Pescoço My flexão [Nm]	-	310	155	155	93	68	43
Pescoço My extensão [Nm]	-	135	67	61	37	27	17
Pescoço Fz força de tração máxima [kN]	-	4170	2620	2070	1490	1130	780
Pescoço Fz força de compressão máxima [kN]	-	4000	2520	2520	1820	1380	960
Tórax aceleração a3ms [g]	60	60	60	60	60	55	50
Tórax compressão máx [mm]	76	63	52	52	40	34	Sem indicação
Fêmur força de compressão [kN]	10,0	10,0	6.8	6.8	Sem indicação	Sem indicação	Sem indicação

ANEXO O – GRAU DE FERIMENTOS E FREQUÊNCIA EM ACIDENTES

(GONTER, 2007)

Tabela 2.1: Severidade de ferimentos de acordo com a AIS com exemplos de ferimentos [Kra98] e grau de letalidade [GIDAS].

AIS	Severidade dos Ferimentos	Ferimentos (exemplos)	Taxa de Letalidade
0	Sem ferimentos	-	0%
1	Leves	Escoriações, lacerações, entorses, contusões, queimaduras de 1° e 2° graus em no máximo 10% do corpo.	0%
2	Extensos	Extensas escoriações e contusões, concussão cerebral leve com amnesia, queimaduras de 2° graus em até 15% do corpo.	0%
3	Graves	Fratura de crânio sem o saída de líquidos, concussão cerebral com perda da consciência, pneumotórax.	4%
4	Significativos	Fratura de crânio com perda de líquidos, concussão cerebral com perda da consciência por mais de 24 horas, perfuração do tórax.	22%
5	Críticos	Fratura de crânio com hemorragia cerebral, ruptura dos órgãos internos, queimaduras de 3° grau até 90% corpo.	69%
6	Máximo	Contusão massiva na cabeça, laceração no tronco cerebral, fratura até a base do crânio, ruptura da aorta, separação entre o tórax e a pélvis.	100%

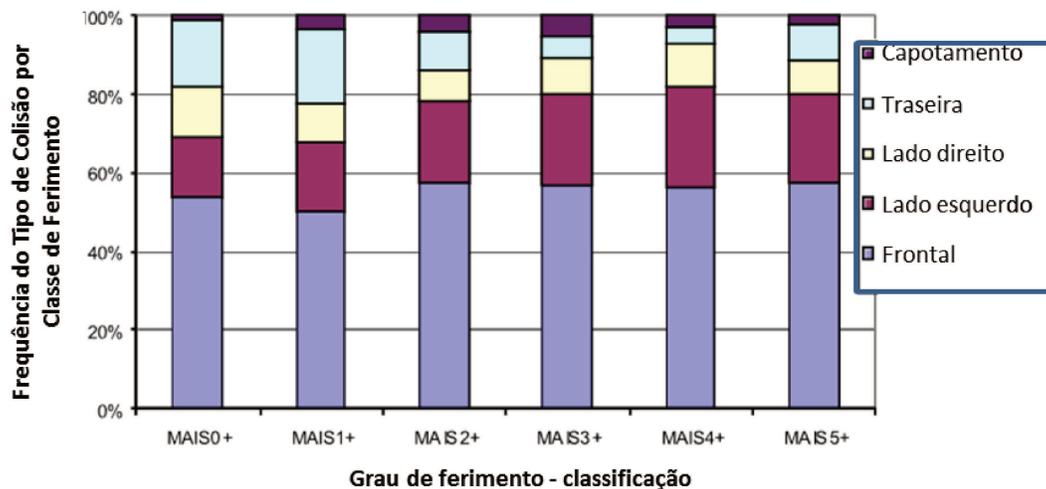


Fig. 2.2: Frequência do tipo de colisão por classe de ferimento (n=4983).

ANEXO P – RISCO DE FERIMENTOS DE ACORDO COM TAMANHO E PESO DOS OCUPANTES

(GONTER, 2007)

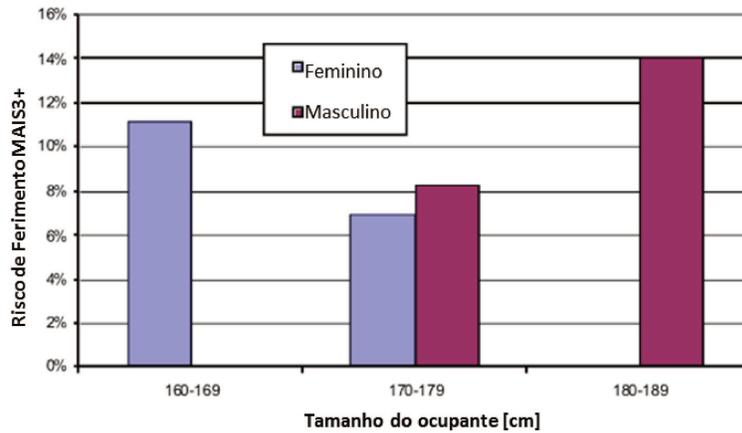


Fig. 2.12: Variação do risco de ferimento MAIS3+ do tamanho do ocupante com relação ao gênero.

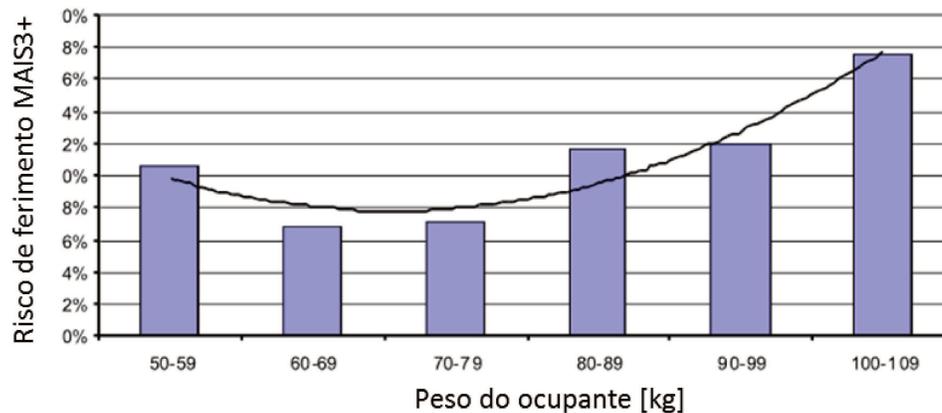


Fig. 2.13: Variação do risco de ferimento MAIS3+ com relação ao peso do ocupante com linha de tendência de um polinômio de segundo grau.

(GONTER, 2007)

Denominação do <i>Dummy</i>	Tamanho {cm}	Peso [kg]
5% feminino	153	49
5% feminino maior	153	63
50% feminino	166	63
50% masculino menor	178	68
50% masculino	178	78
50% masculino maior	178	89
95% masculino menor	189	80
95% masculino	189	102

Tabela 3.2: características dos tipos relevantes de ocupantes para pesquisas em análise de acidentes.

APÊNDICE A – DIAGRAMA DE OTIMIZAÇÃO NO MODEFRONTIER

