

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

Projeto, Construção e Teste de um Boneco de Ensaio de Dispositivos de Retenção Infantil

Autor: **Alexandre Fonseca Jorge**
Orientador: **Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda**
Co-orientador: **Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka**

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

Projeto, Construção e Teste de um Boneco de Ensaio de Dispositivos de Retenção Infantil

Autor: **Alexandre Fonseca Jorge**

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda**

Co-orientador: **Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka**

Curso: **Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Materiais e Processos de Fabricação**

Dissertação de mestrado acadêmico, apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2006
S. P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

J768p Jorge, Alexandre Fonseca
Projeto, construção e teste de um boneco de ensaio de dispositivos de retenção infantil / Alexandre Fonseca Jorge. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientadores: Antonio Celso Fonseca de Arruda,
Paulo Roberto Gardel Kurka
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Segurança de trânsito e crianças. 2. Automóveis – Cintos de segurança. 3. Dispositivos de retenção infantil de uso automotivo. 4. Automóveis – Testes de impacto
I. Arruda, Antonio Celso Fonseca de. II. Kurka, Paulo Roberto Gardel. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Titulo em Inglês: Project, construction and testing of a dummy for testing child restraint systems

Palavras-chave em Inglês: Child restraint systems in automobiles, Impact tests, Automotive safety, Child Dummies

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Helder Anibal Hermini e Álvaro Costa Neto

Data da defesa: 26/10/2006

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

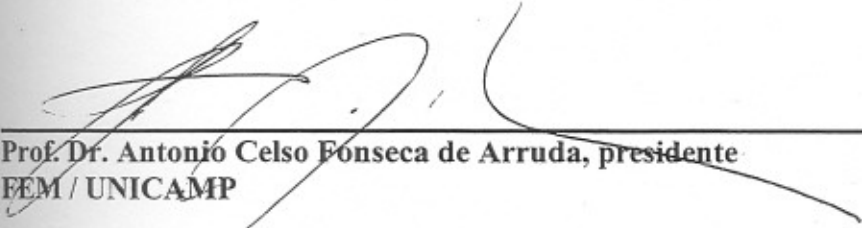
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Projeto, Construção e Teste de um Boneco de Ensaio de Dispositivos de Retenção Infantil

Autor: Alexandre Fonseca Jorge

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda

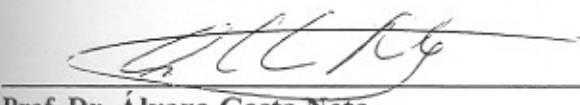
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka



Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda, presidente
FEM / UNICAMP



Prof. Dr. Helder Aníbal Hermíni
FEM / UNICAMP



Prof. Dr. Álvaro Costa Neto
EESC / USP

Campinas, 26 de outubro de 2006

200925589

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus queridos pais.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda de algumas pessoas, às quais eu presto minha homenagem:

Aos meus pais e irmã, pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador e co-orientador, que me mostraram os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e funcionários que contribuíram, direta ou indiretamente, com este trabalho, em especial o Prof. Afonso Alonso, da FEEC, e a Profa. Dra. Cecília Zavaglia, da FEM.

Ao pessoal da CESVI Brasil e da General Motors do Brasil, que viabilizaram a realização dos ensaios necessários.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A todos os amigos que conviveram comigo durante esse período.

Resumo

JORGE, Alexandre Fonseca. *Projeto, Construção e Teste de um Boneco de Ensaio de Dispositivos de Retenção Infantil*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 60p. Dissertação (mestrado).

Um dispositivo de retenção infantil, a ser certificado pela norma NBR14400, tem como um dos principais requisitos atingir determinados níveis de performance em ensaios de impacto. Durante seu desenvolvimento, o dispositivo deve ser submetido a esse teste várias vezes, até ser aprovado, o que envolve altos custos. Este estudo propõe um teste de impacto simplificado, não para substituir o teste de certificação, mas na condição de teste de desenvolvimento preliminar e eliminatório. O principal equipamento envolvido, neste estudo, é o boneco de testes, que possui simplificações tanto na parte biomecânica quanto na parte de instrumentação. Como vantagem, quando comparado ao boneco instrumentado completo, seu custo é significativamente menor. Neste trabalho são apresentadas as condições de contorno envolvidas no projeto, na construção e no uso desse boneco. Adicionalmente, são reportados os resultados comparativos dos ensaios de impacto entre o boneco construído e o instrumentado completo Hybrid III. Tais resultados validam a proposta do projeto.

Palavras Chave:

Retenção infantil, segurança veicular, testes de impacto, bonecos de ensaio

Abstract

JORGE, Alexandre Fonseca. *Project, Construction and Tesing of a Dummy for Testing Child Restraint Systems*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 60p. Dissertação (mestrado).

A child restraint system, to be certified to NBR 14400 standard, has as one of its main requirements, to reach specific performance levels under impact tests. During its development, the device has to undergo several times such tests, which are expensive, until approval. This study proposes a simplified impact test, not to replace the certification test, but as a preliminary and eliminatory test. The main equipment involved in this study is the test dummy, which has simplifications both on biomechanical and instrumentation aspects. As an advantage, when compared to a complete instrumented dummy, it has a considerably lower cost. In this work, the guiding conditions involved in the project, construction and use of that dummy are presented. Also, the results of comparative impact testes between the projected dummy and the complete instrumented dummy Hybrid III are reported. Such results validate the proposal of the project.

Key words:

Child restraint, automotive safety, impact tests, dummies

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura	xii
1 Introdução	1
2 Revisão da Literatura	4
3 Materiais e Métodos	18
4 Resultados	35
5 Discussão dos Resultados	46
6 Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos	49
Referências Bibliográficas	51
Apêndice A	54
Apêndice B	56
Anexo I	60
Anexo II	62

Lista de Figuras

1	Evolução das proporções corporais da criança	8
2 (a e b)	Bonecos TNO P1,5 (18 meses) e P6 (6 anos)	12
3	Estrutura e instrumentação de um Hybrid III de 6 anos	12
4	Exemplos de modelos multi-corpos de dummies, para simulação	13
5	Corredor de desaceleração para impacto frontal	14
6	Limites de deslocamento da cabeça, norma NBR 14400	15
7	Exemplo de pulso e intervalos de tempo	16
8	Tipos de dispositivo para cada grupo	17
9 (a e b)	Manequim, e boneco feito a partir da adaptação deste	19
10	Placas de chumbo afixadas por dentro do boneco	21
11	Molas utilizadas no pescoço	22
12	Aspecto do boneco com o pescoço (apenas as molas)	22
13	Teste estático do pescoço segundo a ECE R44	23
14	Resposta de sensores mecânicos de aceleração, em relação à largura de pulso.	25
15	Placas de circuitos, vistas pelas costas do boneco	27
16	Painel frontal	28
17	Filtro Sallen-Key de ganho unitário	29
18	Característica de filtros de segunda ordem, num exemplo de 1kHz	29
19	Destaque da localização das marcas de referência	34
20 (a - f)	Comportamento do boneco e da cadeirinha com o impacto	36
21	Deslocamento da cabeça do boneco	37
22 (a - d)	O boneco solto colide com o banco da frente...	38

23	... e depois cai para fora do veículo	38
24	Disposição dos bonecos antes do teste	39
25 (a e b)	Danos ao pescoço e ao painel	40
26	Desaceleração da carroceria	40
27 (a - h)	Seqüência de imagens mostrando o movimento do boneco construído	41
28 (a - h)	Seqüência de imagens mostrando o movimento do boneco Hybrid III	42
29	Deslocamento da cabeça do dummy simplificado	43
30	Deslocamento da cabeça do Hybrid III	43
31	Tabela e gráfico com as desacelerações detectadas no Hybrid III	44
32	Especificações do banco segundo a norma	55
33	Gaiola de impacto, com banco	55
34 (a e b)	Estrutura de um FSR, e sua característica resistência x força	56
35	Matriz de FSR	57
36	Coloração do filme sensível	58
37	Categorias de faixa de frequência , segundo a ISO 6487	62

Lista de Tabelas

1	Comparação entre as dimensões do boneco construído e o de 6 anos da norma	20
2	Comparação entre as dimensões do boneco construído e o boneco de 10 anos da norma	20
3	Distribuição de massas dos bonecos P6 e P10 da norma, em comparação com o boneco construído	21
4	Teste das molas do pescoço	23
5	Valores indicados pelo painel	27
6	Leitura do painel do dummy simplificado	45
7	Comparação entre as desacelerações medidas pelos bonecos	45

Nomenclatura

INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CESVI	Centro de Experimentação e Segurança Viária
NBR	Norma Brasileira
C.I.	Circuito Integrado
G	Gravidade (medida de aceleração)
LED	<i>Light-Emitter Diode</i>
ECE	<i>Economic Comission Europe</i>
TNO	<i>Netherlands Organisation for Applied Scientific Research</i>
BS	<i>British Standard</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Transporte de crianças no Brasil

No Brasil, o trânsito é a maior causa de mortes acidentais de crianças na faixa etária de 0 a 14 anos. Segundo dados do Ministério da Saúde, em 2003, de um total de 5993 mortes acidentais, 2446 resultaram de acidentes de trânsito, sejam elas na condição de pedestres, ciclistas ou ocupantes de veículos. Considerando que as crianças não dirigem, esse número é muito alto. E a quantidade de crianças que sofrem lesões ou deformidades graves que irão afetá-las pelo resto de suas vidas, é maior ainda.

Essa situação é causada por vários fatores, mas no Brasil ela é agravada pelo baixo poder aquisitivo e pela falta de uma cultura de segurança veicular entre a população. Na Europa, por exemplo, muitos consumidores consideram a segurança como fator decisivo na aquisição de um veículo, enquanto no Brasil quase sempre o fator decisivo é o preço. Mesmo as pessoas que têm condições de adquirir um veículo com mais equipamentos de segurança muitas vezes não o fazem, porque não reconhecem a importância destes. Em vez disso, preferem gastar uma quantia de dinheiro igual ou maior com itens supérfluos tais como rodas esportivas e equipamentos de som.

Tal problemática se estende às crianças. Para o transporte de crianças em veículos de passeio, muitas famílias ainda desconhecem, ou não acreditam, que é necessário transportá-las

utilizando os dispositivos de retenção adequados, também conhecidos como “cadeirinhas”. Muitos bebês ainda são transportados no colo das mães, e muitas crianças pequenas ainda são acomodadas no banco de trás utilizando apenas o cinto de segurança do próprio veículo, o que não é adequado. Isso quando não viajam totalmente soltas.

De fato, a lei ainda não obriga o uso das cadeirinhas, ou seja, ninguém recebe multa por não utilizá-las. O Código de Trânsito Brasileiro apenas menciona a obrigatoriedade de transportar as crianças no banco de trás, conforme descrito no artigo 64:

“Art. 64. As crianças com idade inferior a dez anos devem ser transportadas nos bancos traseiros, salvo exceções regulamentadas pelo CONTRAN”.

Mesmo entre as famílias que têm consciência da necessidade de utilizar o dispositivo de retenção, muitas esbarram na falta de poder aquisitivo para adquiri-los. E dentre as que têm condições de adquiri-los, muitas acabam considerando apenas o preço como fator decisivo na hora da compra. Isso não deveria ser um problema, caso houvesse a certeza de que todos os dispositivos à venda no mercado, mesmo os mais baratos, atendessem a requisitos mínimos de segurança, o que ainda não é uma realidade. Existe uma norma, a NBR 14400, que estabelece os requisitos de segurança para as cadeirinhas, mas a certificação é opcional, ou seja, os fabricantes não são obrigados a obter a certificação para poder colocar o produto no mercado. Isso faz com que existam à venda produtos potencialmente inseguros, que oferecem uma falsa sensação de segurança. O lado cruel desse fato, é que a falta de segurança destes só será descoberta após um acidente automobilístico.

Ainda neste ano (2006), essa situação deverá mudar, pois está prevista uma mudança na lei para que a certificação passe a ser obrigatória. Isso significa que todas as cadeirinhas terão que obter a certificação para serem comercializadas.

1.2 Desenvolvimento de cadeirinhas

O desenvolvimento de um dispositivo de retenção infantil envolve várias etapas, e vários aspectos do produto precisam ser cuidadosamente projetados e depois testados. Um dos principais requisitos para a certificação do dispositivo conforme a norma NBR 14400, é conseguir determinados níveis mínimos de performance (que serão mencionados posteriormente) em ensaios de impacto, os quais simulam uma colisão veicular. Portanto, ao longo do desenvolvimento de uma cadeirinha, pode ser necessário realizar esses testes de impacto várias vezes, até que ela consiga ser aprovada nesse quesito.

Contudo, os ensaios de impacto são bastante onerosos, sobretudo para uma empresa de pequeno porte que esteja fazendo tal desenvolvimento. Os equipamentos necessários para um laboratório de testes de impacto possuem custo viável somente para grandes corporações que necessitem realizar um grande volume de testes desse tipo, como as montadoras de automóveis. Por exemplo: Apenas um *dummy* de criança de utilização prevista na norma, custa cerca de dez mil dólares (US\$10.000,00), sem incluir instrumentação. Conseqüentemente, são raras as instalações desse tipo no Brasil, e o custo de se alugar um laboratório desses para realizar um ensaio é extremamente alto, cerca de trinta mil reais (R\$ 30.000,00) (dado de abril de 2006). Existe ainda a opção de se realizar os testes no exterior, o que é mais demorado e também pode custar caro.

Sendo assim, este estudo busca uma alternativa de um boneco de impacto (*dummy*), que seja uma versão simplificada e de baixo custo do equipamento completo, para ser utilizado em conjunto com um método simplificado de ensaio de impacto. A intenção não é substituir o teste completo, que ainda é necessário para a certificação pela norma, mas sim possibilitar um teste de custo reduzido que possa ser realizado durante o desenvolvimento da cadeirinha, e possa ser realizado pelo próprio fabricante. Esse teste teria caráter preliminar e eliminatório, ou seja, se o dispositivo de retenção não passar no teste preliminar, não adianta submetê-lo ao teste completo pois ele também não vai passar. Mas se o dispositivo passar no teste preliminar, isso significa que há chances de ele passar no teste completo. Um exemplo de teste simplificado seria um ensaio vertical de impacto, cujos detalhes podem ser vistos no Apêndice 1.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

2.1 Fenômenos envolvidos em uma colisão veicular

No evento de um acidente automobilístico, a um observador externo pode parecer que ocorreu apenas uma colisão entre dois veículos, ou entre um veículo e um obstáculo qualquer, dependendo do caso.

No entanto, além dessa colisão mais evidente, existe também a colisão entre os ocupantes do veículo e o interior do mesmo. Essa colisão é particularmente grave quando os ocupantes não estão utilizando cinto de segurança, pois o veículo desacelera rapidamente enquanto eles prosseguem na velocidade original até colidirem violentamente com algo que os retenha no interior do veículo, ou mesmo fora dele. No caso de estarem utilizando o cinto, a colisão é entre os ocupantes e seus cintos de segurança, o que faz com que durante a maior parte do tempo eles sejam desacelerados junto com o resto do veículo, de maneira mais gradual.

Há ainda uma terceira colisão, que é a que ocorre no interior dos corpos dos ocupantes, com seus órgãos internos colidindo entre si ou com a estrutura óssea, uma vez que eles não estão presos rigidamente. Um exemplo disso é o cérebro, que pode sofrer danos ao colidir com o interior da caixa craniana, mesmo que esta não sofra fratura.

2.2 Dinâmica de uma colisão veicular

O processo de transporte veicular, inclusive no que diz respeito às colisões e atuação dos dispositivos de retenção, pode ser explicado por meio das leis básicas da cinemática de Newton, complementadas pelos conceitos de trabalho e energia, e pela lei da conservação de energia.

A primeira lei de Newton diz que é necessária a aplicação de forças tanto para iniciar o movimento de um corpo quanto para pará-lo, e também para qualquer mudança em sua velocidade ou trajetória.

Já a segunda lei de Newton diz que a velocidade adquirida por um corpo é proporcional ao produto da força aplicada com a duração de sua aplicação, e inversamente proporcional à massa desse corpo. Ou seja:

$$DV = (F * DT) / M \Rightarrow F = M * A, \quad (1)$$

onde M é a massa do corpo, e A é a aceleração (igual a DV/DT). Com essa lei, já é possível entender porque algumas situações podem ser perigosas aos indivíduos pois, se o tempo disponível para realizar uma mudança de velocidade for extremamente curto (DT pequeno), como no evento de um impacto, a segunda lei requer o surgimento de uma força (F) muito grande para realizar essa mudança de velocidade (DV).

E por último, a terceira lei de Newton é a lei da ação-reação, que diz que para cada força de ação existe uma outra força igual e contrária, que é a sua reação.

As leis de Newton se referem a corpos rígidos. No entanto os corpos envolvidos no processo (passageiros, veículos, etc) são deformáveis. Isso requer que também sejam levados em conta os conceitos de trabalho e energia cinética.

Existem várias formas de energia. A forma de energia de interesse neste caso é a Energia Cinética (K), que um corpo possui quando está em movimento. Sua expressão se dá por:

$$K = (M * V^2) / 2, \quad (2)$$

onde M é a massa do corpo e V é a sua velocidade instantânea. Por essa expressão tem-se que um corpo em repouso não possui energia cinética. Além disso, a energia cinética varia com o quadrado da velocidade, ou seja, dobrar a velocidade quadruplica essa energia.

Pela Lei da Conservação da Energia, qualquer energia sempre é transformada em, e a partir de, outras formas de energia. Não é possível se criar ou extinguir energia. A aplicação de trabalho é um dos meios pelos quais é possível se adicionar ou extrair energia cinética de um corpo. O Trabalho (W) é definido como sendo o produto escalar das grandezas vetoriais força e deslocamento. Ou seja:

$$W = F * d * \cos \theta \text{ [N/m]} \quad (3)$$

onde F e d são respectivamente os módulos dos vetores força e deslocamento e θ é o ângulo entre eles. Por essa expressão temos que, para haver trabalho, é necessário que o ponto de aplicação da força esteja em movimento. O trabalho se relaciona com a energia cinética segundo a expressão do Teorema do Trabalho-Energia Cinética (Halliday, 1994):

$$W = K_f - K_i = \Delta K \quad (4)$$

onde K_f é a energia cinética final, e K_i é a energia cinética inicial.

Como exemplo das diferenças na transferência de energia, considere-se o exemplo de dois veículos idênticos que estão à mesma velocidade, portanto possuem inicialmente a mesma energia cinética, mas um deles freia até parar enquanto o outro colide com uma barreira rígida. No caso do primeiro veículo, ao acionar os freios, surge uma força na interface entre os pneus e o pavimento. Essa força se move junto com o veículo e realiza trabalho negativo, extraindo sua energia cinética até que ele pare totalmente. No caso do segundo veículo, ao colidir com a barreira rígida, ele também perde rapidamente toda sua energia cinética. Contudo, a barreira por ser imóvel não realiza trabalho, e portanto não extrai essa energia do veículo. Como a energia precisa ser conservada, ela então permanece no veículo e é absorvida através da deformação de sua própria estrutura.

Processos análogos ocorrem com os ocupantes dos veículos. No caso de um carro que esteja freando, ao reduzir a velocidade gradativamente, haverá várias forças agindo sobre o ocupante do veículo, para que ele perca sua velocidade junto com o mesmo. Por exemplo: a força

de atrito com o assento, a força exercida pelos braços contra o volante, pelos pés contra o assoalho do veículo. Essas forças extraem a energia cinética do ocupante através da realização de trabalho, uma vez que seus pontos de aplicação se movem junto com o veículo. Para uma redução de velocidade muito gradual, as forças mencionadas acima são suficientes para manter o ocupante em seu lugar. No entanto, quanto mais brusca a desaceleração, mais essas forças acima se tornam insuficientes para reter o ocupante, tornando-se necessária a existência de um dispositivo de retenção como o cinto de segurança, que é capaz de aplicar uma força muito maior ao ocupante, de forma a extrair sua energia cinética e fazê-lo parar junto com o veículo.

No caso extremo de uma colisão veicular em que o ocupante não esteja retido, ele passa por um processo similar ao que passa o próprio veículo. Ao colidir, o carro pára muito rapidamente, e o ocupante não-retido continua seu movimento para a frente com muito pouca atenuação, até colidir com partes do interior do veículo. Como essas superfícies de contato são pequenas e no momento do contato provavelmente já perderam toda sua velocidade em relação ao solo, então as forças que são aplicadas para mudar a velocidade do ocupante para zero são bastante altas, e muito pouca ou nenhuma energia cinética é extraída do seu corpo por trabalho. Como o ocupante também acaba parando, ou seja, perdendo toda sua energia cinética, mas esta não é extraída por trabalho, então ela tem que ser absorvida pelo seu corpo. Como isso envolve forças localizadas em pequenas áreas de contato, e de amplitudes muito altas para o corpo humano, então essa energia acaba sendo absorvida através de danos e rupturas de diferentes tecidos e estruturas, ou seja, lesões. De forma análoga, as estruturas com as quais o ocupante se colide também são danificadas, absorvendo uma quantidade mínima de energia (insuficiente para evitar suas lesões).

Levando em conta essas considerações sobre a dinâmica do impacto, Nahum (1993), enumera as seguintes “máximas” para o projeto de um sistema de retenção que ofereça melhor proteção ao ocupante:

- a) Maximizar o tempo de aplicação das forças de retenção
- b) Maximizar a distância percorrida pelo ponto de aplicação da força sobre o corpo, em relação ao solo.
- c) Aplicar uma força de retenção o tão logo quanto possível, e o tão grande quanto possível, durante uma colisão.

- d) Distribuir as forças sobre a maior área possível
- e) Minimizar articulações (flexões e extensões), deformações locais e as taxas dessas deformações, e acelerações inerciais locais durante a retenção.
- f) Aplicar as forças de retenção sobre estruturas do esqueleto, e minimizar as cargas nos tecidos moles adjacentes.

2.2 Diferenças estruturais entre crianças e adultos

Uma criança não é de forma alguma um “adulto pequeno”. Essa seria uma aproximação grosseira. De fato, mesmo sem levar em conta a estatura, as diferenças entre o corpo de uma criança e de um adulto são significativas, principalmente no que diz respeito à estrutura óssea.

Uma das principais diferenças anatômicas entre crianças e adultos é a proporção da cabeça (Figura 1). Num recém-nascido, a cabeça representa 30% do peso corporal e 1/4 da altura, enquanto no adulto ela representa apenas 6% do peso e 1/7 da altura. Por esse motivo, o centro de gravidade de uma criança é relativamente mais alto, o que pode levar a uma interação diferente com os dispositivos de retenção, se comparada com um adulto.

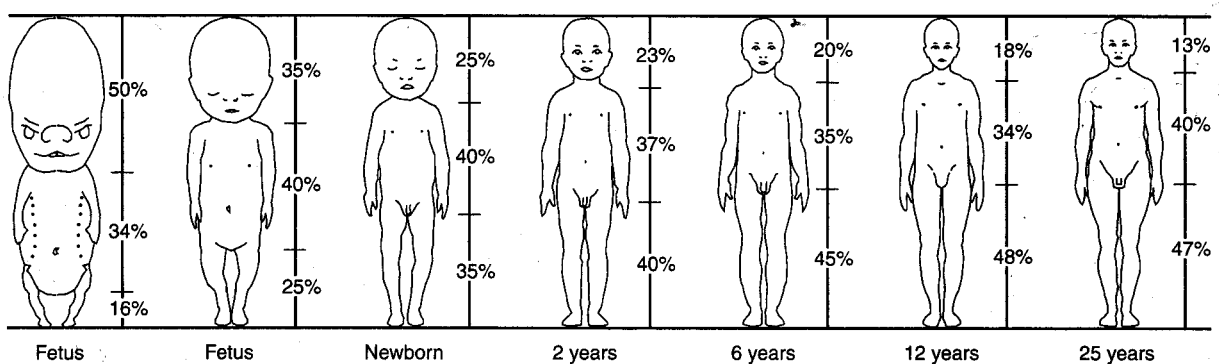


Figura 1: Evolução das proporções corporais da criança (Diméglio, 2001)

Essa diferença de proporções também implica em maiores cargas no pescoço, uma vez que uma massa proporcionalmente maior está sendo suportada por uma estrutura menor. E o pescoço de uma criança, por sua vez, é bem mais flexível que o dos adultos, com vértebras compostas tanto por segmentos ósseos quanto por cartilagem, e ligamentos mais folgados para acomodar o

crescimento. Essa combinação permite que no evento de uma colisão o pescoço se alongue mais facilmente, o que aumenta o risco de lesão da medula espinhal por estiramento, sem que para isso precise haver fratura das vértebras. Esse risco aumenta com a severidade do impacto, mas diminui com a idade da criança. Por esse motivo que as crianças de até cerca de 1 ano de idade devem utilizar dispositivos de retenção em que elas fiquem voltadas para trás.

Na caixa torácica, as costelas das crianças são mais flexíveis que as dos adultos, uma vez que o módulo de elasticidade do osso de uma criança é menor do que de um adulto. Se por um lado isso significa uma menor probabilidade de fratura das mesmas, por outro lado facilita a lesão dos órgãos internos por compressão (esmagamento). O abdômen de uma criança protrude mais facilmente que o de um adulto, e ainda o fígado e baço estão menos protegidos pela caixa torácica, pois esta é menos alongada nessa idade. Na pélvis, as cristas ilíacas são menos salientes, e ainda possuem cartilagem de crescimento. Elas só estarão completamente consolidadas no início da puberdade.

Todas essas diferenças constituem um desafio no projeto de dispositivos de retenção para criança e indicam que, quanto mais jovem ela for, mais inadequados são os dispositivos de retenção existentes no veículo, os quais foram projetados para proteger um adulto jovem de proporções medianas. Portanto, fazem-se necessários os dispositivos de retenção infantil, não apenas para ajustar o banco e cinto de adulto à criança, mas também para servir como mais uma etapa de absorção de energia, entre a criança e o veículo.

2.3 Bonecos antropomórficos: Histórico

Apesar de todos os esforços feitos nas últimas décadas para se projetar dispositivos de segurança cada vez melhores, sempre existiu, e ainda existe, uma dificuldade: O fato de todo esse desenvolvimento ser centrado em um único objeto, o corpo humano. No entanto, nenhum corpo humano vivo pode ser efetivamente usado para testar conceitos e avaliar sistemas, exceto em casos de muito baixa energia, por causa dos riscos inadmissíveis a que essas pessoas seriam submetidas, podendo sofrer danos físicos irreversíveis ou mesmo perecer. Portanto, para se fazer

testes de dispositivos de segurança que oferecessem dados válidos, os cientistas e engenheiros tiveram de buscar alternativas.

Inicialmente, foram utilizados cadáveres como objetos de teste, por serem substitutos muito próximos de um ser humano vivo. Contudo, sua utilização implicava em vários problemas, incluindo desde dificuldades de conservação das propriedades dos tecidos, até problemas de pouca disponibilidade e questionamentos éticos. Animais, como porcos e chimpanzés, também serviram em alguns testes, mas as diferenças anatômicas, em relação ao corpo humano, eram muito grandes.

Conseqüentemente, os objetos de teste que passaram a ser cada vez mais usados foram os bonecos antropomórficos, também conhecidos como *dummies*. Ao longo dos anos, eles têm evoluído de forma a apresentar melhor fidelidade biomecânica, fornecer uma quantidade de dados cada vez maior e com melhor repetibilidade.

Os primeiros *dummies* foram utilizados pela indústria aeronáutica (aviação militar), para testes principalmente de sistemas de ejeção de pilotos de aeronaves, e com antropometria baseada nas características dos cadetes da força aérea (*USAF Anthropometry*). Em 1949, surge o Sierra Sam, com esse propósito. Era um boneco extremamente robusto e durável, mas sua biofidelidade era bastante limitada, e suas medições se resumiam aos componentes ortogonais de aceleração na cabeça. Contudo, ele representava o estado da arte em tecnologia naquela época.

Entre os anos 60 e 70, paralelamente à evolução dos *dummies* de uso aeroespacial, são desenvolvidos os primeiros *dummies* específicos para testes automotivos, buscando reproduzir melhor o comportamento do corpo humano no caso específico de uma colisão veicular.

No início dos anos 70, surgem *dummies* para simular crianças de 3 e 6 anos respectivamente. São eles os Sammy e Toddler da Sierra, e logo depois os VIP 3C e 6C, da *Alderson Research Laboratories*. Os dados biométricos de crianças, sobre os quais esses projetos foram baseados, ainda eram bastante escassos. Os VIP foram projetados para ter todos os movimentos de juntas, inclusive com a possibilidade de serem posicionados tanto na posição

sentada quanto de pé, se opondo à postura permanentemente sentada que era comum nos *dummies* da época. A necessidade de instrumentação também foi considerada, com locais para a instalação de acelerômetros de três eixos no centro de gravidade da cabeça, e no centro de gravidade do tórax superior.

No final dos anos 70 e início dos anos 80, foi desenvolvida na Europa (pela TNO e outras) a família P de *dummies* de criança (Figura 2), que hoje em dia cobre praticamente todas as faixas etárias de crianças até 12 anos. Esses bonecos são utilizados até hoje para a certificação segundo a norma européia ECE R44, e também são adotados por outras normas internacionais, inclusive pela brasileira (a qual se baseia na européia). Esses bonecos possuem um esqueleto de metal e poliamida, com partes do corpo moldadas em poliuretano. Suas dimensões e massas são baseadas na antropometria do 50º. percentil de crianças das respectivas idades. Atualmente, já se encontra em desenvolvimento a série Q, que futuramente deverá substituir a série P. O boneco Q3 (de três anos) já está disponível comercialmente.

Em paralelo ao desenvolvimento europeu, no início dos anos 90 surgem nos EUA os *dummies* de criança da família Hybrid III, família essa que já existia desde 1976 com *dummies* adultos. Esses bonecos são adotados pelas normas norte-americanas. Eles possuem uma construção parecida com a dos bonecos europeus, e também permitem realizar diversas medições quando instrumentados (Figura 3).



Figura 2 (a e b): Bonecos TNO P1,5 (18 meses) e P6 (6 anos)

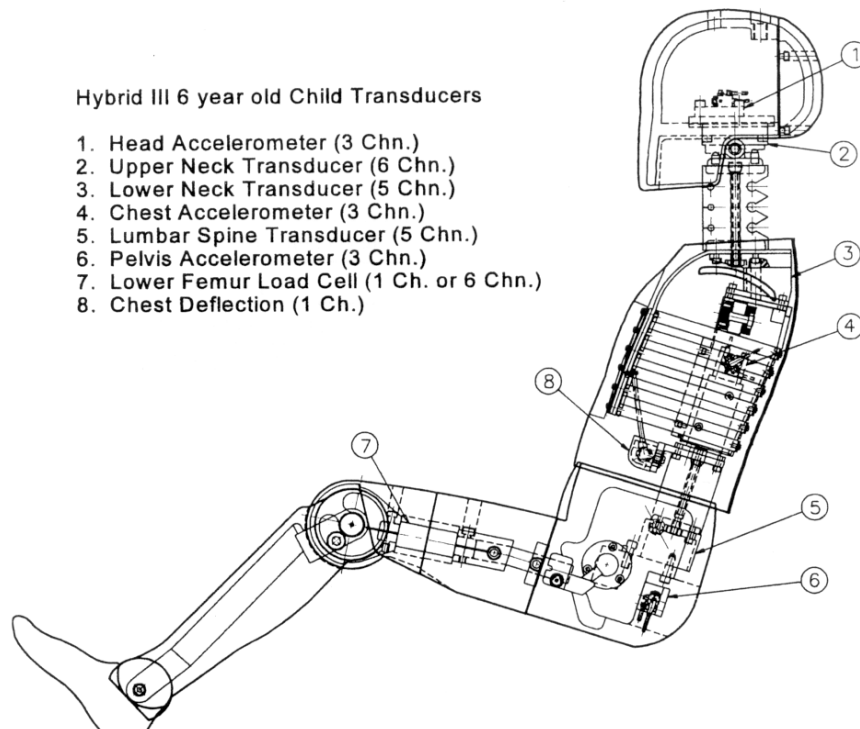


Figura 3: Estrutura e instrumentação de um Hybrid III de 6 anos

Além da evolução dos *dummies* de adultos e crianças para modelos cada vez mais sofisticados, outra tendência importante é o uso de *dummies* virtuais, os quais tiveram seu desenvolvimento iniciado nos anos 90, e hoje já possuem modelos disponíveis comercialmente, utilizando tecnologias como a de multi-corpos (Figura 4) e a de elementos finitos. A maioria dos modelos reproduz os próprios *dummies* convencionais, mas também existem modelos, mais complexos, baseados diretamente no corpo humano. De fato, a tendência é que modelos virtuais sejam cada vez mais utilizados nas diferentes etapas do desenvolvimento de um veículo, a fim de reduzir custos.

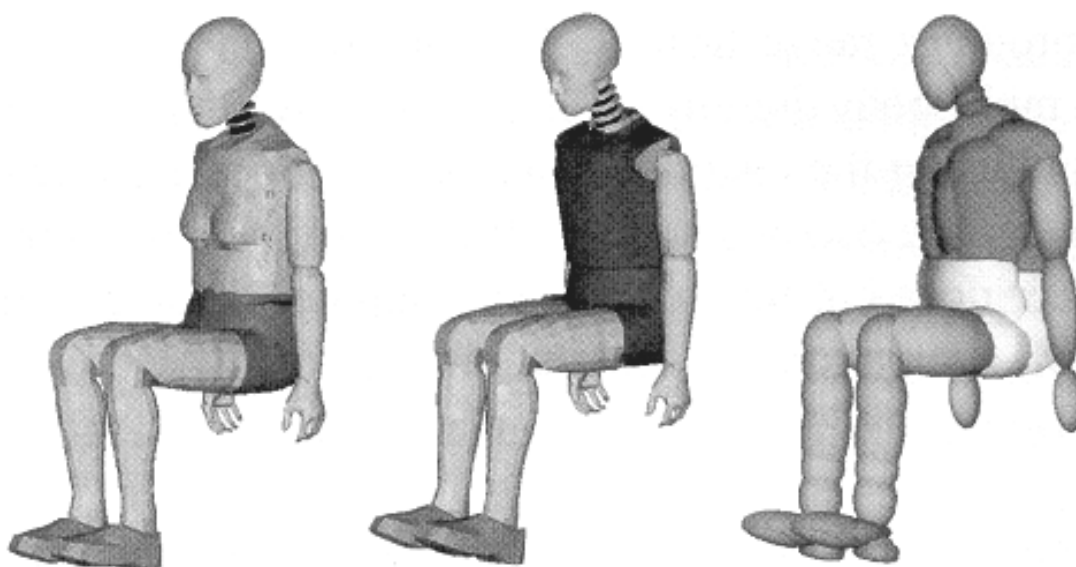


Figura 4: Exemplos de modelos multi-corpos de dummies, para simulação (Seiffert, 2003)

2.4 Norma NBR 14400

A NBR 14400 é uma adaptação de norma européia ECE R44/03. Basicamente uma versão traduzida e simplificada, com a remoção de alguns itens que eram específicos para a certificação européia.

Para o ensaio dinâmico de impacto frontal, de dispositivos voltados para a frente do veículo, que são os de interesse neste trabalho, a norma especifica que seja utilizado um dos três tipos de ensaio:

- a) Carrinho de ensaio com assento
- b) Carroceria de veículo sobre carrinho de ensaio
- c) Veículo completo em ensaio contra barreira.

A velocidade imediatamente antes do impacto deve ser de 49 ± 1 km/h, e para os ensaios do tipo (a) e (b), a distância percorrida durante a desaceleração deverá ser de 650 ± 50 mm, e a forma de onda do pulso deverá obedecer a um corredor constituído de limites máximos e mínimos ao longo do tempo (Figura 5).

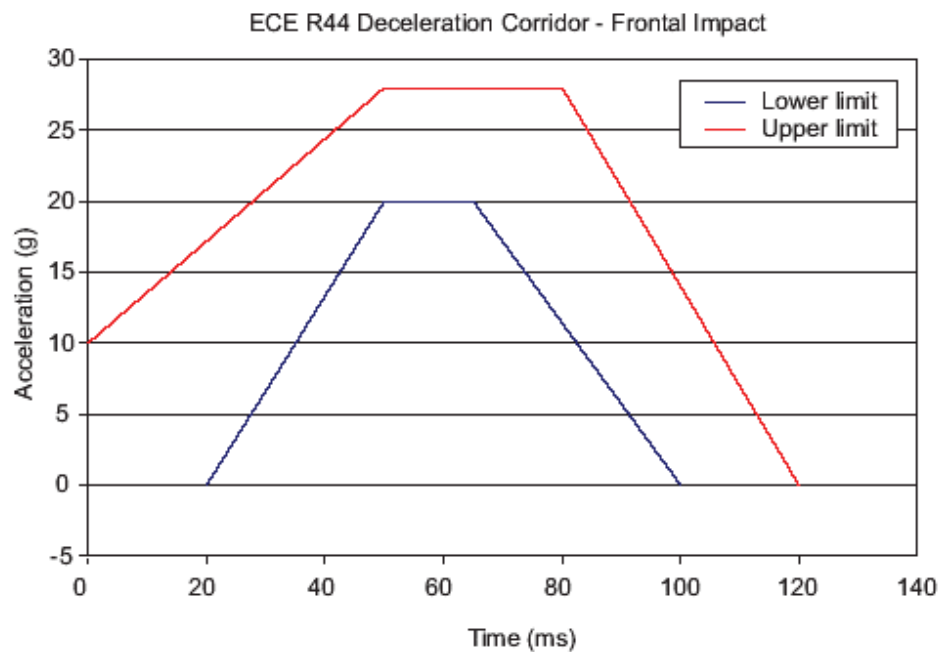


Figura 5: Corredor de desaceleração para impacto frontal.

Nesses testes, um boneco antropomórfico (*dummy*), deve ser fixado ao dispositivo de retenção no lugar da criança, e a norma pede que sejam realizadas as seguintes medições:

- a) Velocidade do carrinho imediatamente antes do impacto
- b) Distância de desaceleração até parar (exceto para o teste de veículo completo)
- c) Deslocamento da cabeça do boneco nos planos vertical e horizontal
- d) Aceleração do tórax em três direções reciprocamente perpendiculares
- e) Qualquer sinal visível de penetração na massa moldável na região abdominal

Feitas essas medidas, os requisitos de performance são:

- a) A aceleração resultante na altura do tórax, não deve superar 55g, em intervalos de somatória igual ou maior a 3ms.
- b) A componente vertical da aceleração, do abdome para a cabeça, não deve superar 30g, em intervalos de somatória igual ou maior a 3ms.
- c) Não deve haver sinais de penetração sobre a massa da região abdominal, causados por qualquer parte do dispositivo de retenção.
- d) O deslocamento da cabeça do boneco não deve ultrapassar os planos BA e DA, mostrados na Figura 6:

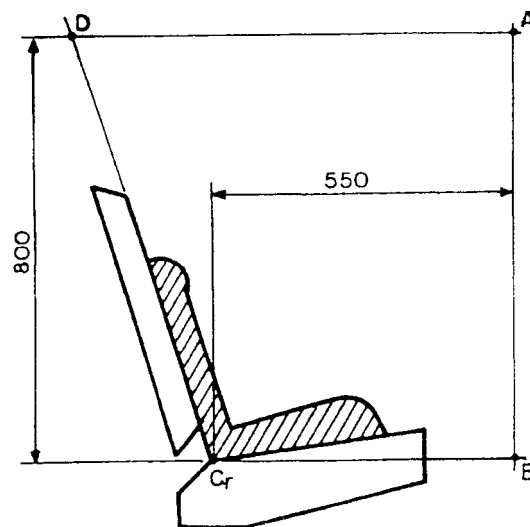


Figura 6: Limites de deslocamento da cabeça, norma NBR 14400

A especificação de intervalos iguais ou maiores a 3 ms para a medida das acelerações, está exemplificada na Figura 7. No pulso hipotético apresentado, o valor de pico é de 9 G, enquanto o maior valor em um intervalo de somatória maior ou igual a 3 ms é de apenas 6 G.

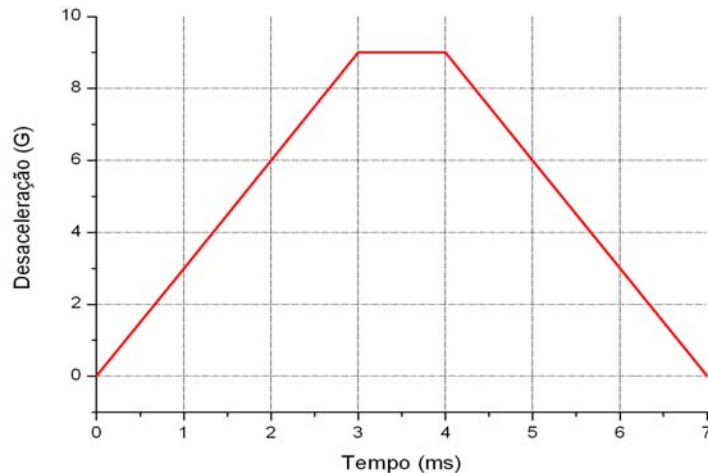


Figura 7: Exemplo de pulso e intervalos de tempo

Os bonecos antropomórficos previstos pela norma para serem utilizados nesses ensaios, são os *dummies* de criança da “série P” da TNO, os mesmos especificados pela norma européia. Os modelos mencionados na norma são os de 9 e 18 meses, e os de 3, 6 e 10 anos.

A norma divide os dispositivos de retenção em cinco “grupos de massa”:

- a) grupo 0: crianças de até 10 kg, altura aprox. 0,72 m, até 9 meses de idade
- b) grupo 0+: crianças de até 13 kg, altura aprox. 0,80 m, até 12 meses de idade
- c) grupo I: crianças de 9 kg até 18 kg, altura aprox. 1,00 m, até 32 meses de idade
- d) grupo II: crianças de 15 kg até 25 kg, altura aprox. 1,15 m, até 60 meses de idade
- e) grupo III: crianças de 22 kg até 36 kg, altura aprox. 1,30 m, até 90 meses de idade

Um dispositivo pode ser projetado para servir a mais de um grupo de massa. Os principais tipos de dispositivos utilizados em cada grupo podem ser vistos na Figura 8. De interesse neste trabalho, são as cadeirinhas em que a criança fica voltada para a frente.

Group 0: up to 10 kg  Baby carrier	Group 0/0+: up to 10/13 kg  Baby seat	Group 0/I: up to 18 kg  Reboard seat	Group I: 9 - 18 kg  5-point belt system
Group I: 9 - 18 kg  Impact absorber	Group I/II: 9 - 25 kg  3-point belt system	Group II: 15 - 25 kg  Impact absorber	Group II/III: 15 - 36 kg  Booster seat with/without sleeping support

Figura 8: Tipos de dispositivo para cada grupo (Seiffert, 2003)

Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1 Construção do boneco de testes simplificado:

A construção do *dummy* simplificado, procurou utilizar materiais de baixo custo e fácil obtenção. Para seu tamanho, foi escolhido o tamanho equivalente a crianças de 6 anos, como no boneco TNO P6 mencionado na norma. Esse tamanho é particularmente interessante porque serve para ensaiar dispositivos de retenção dos grupos II e III. Outro fator que influenciou na escolha foi a disponibilidade de manequins nessas dimensões, que poderiam ser mais facilmente modificados para este propósito.

De fato, sua construção foi feita a partir da adaptação de um manequim de uso geral (Figura 9-a), que era uma estrutura oca de resina reforçada com fibra de vidro, o qual possuía medidas próximas mas não precisas. Sua adaptação foi feita de maneira manual, por um profissional da área de funilaria. Como consequência, sua simetria bilateral não é perfeita, e não há muito controle sobre a espessura de suas paredes externas. Isso insere algumas variáveis de incerteza no experimento. Seria possível obter melhor simetria e precisão dimensional caso, por exemplo, o boneco fosse encomendado já no formato desejado a um fabricante de manequins, em vez de ser adaptado manualmente. No entanto, como isso envolveria a confecção de um molde, só seria viável para produzir várias unidades em série, o que ainda não era o caso.



Figura 9 (a e b): Manequim, e boneco feito a partir da adaptação deste

Objetivando manter a simplicidade e os custos reduzidos, o *dummy* simplificado apresenta várias simplificações quanto à sua biofidelidade, se comparado a um *dummy* completo. Em vez de pernas e braços articulados, ele possui apenas as coxas, com o quadril na posição sentada em um ângulo fixo (Figura 9-b). Dos braços há apenas alguns centímetros de braços abaixo da altura dos ombros. O tronco é todo rígido, não possuindo nem costelas nem uma coluna lombar flexível. Para atingir uma distribuição de massas semelhante à do *dummy* completo, foram afixadas em seu interior algumas placas de chumbo (Figura 10).

Comparando-se as medidas externas (Tabela 1), é possível notar que elas se aproximam, embora com uma certa margem de erro, sendo o corpo ligeiramente maior e a cabeça ligeiramente menor, em relação ao boneco especificado na norma. Se fosse considerada uma maior tolerância dimensional, esse boneco poderia também ser utilizado na categoria superior, de 10 anos (Tabela 2), com as mesmas dimensões externas, necessitando apenas do ajuste apropriado das massas internas (Tabela 3).

Dimensões	<i>Dummy</i> simplificado (cm)	<i>Dummy</i> 6 anos (P6) (cm)	Fator de diferença
Altura sentado	68,0	63,6	107 %
Altura até os ombros, sentado	43,0	40,3	107 %
Perímetro torácico	59,5	58,0	103 %
Largura da cabeça	12,7	14,1	90 %
Profundidade da cabeça	16,5	17,5	94 %

Tabela 1: Comparação entre as dimensões do boneco construído e o de 6 anos da norma

Dimensões	<i>Dummy</i> simplificado (cm)	<i>Dummy</i> 10 anos (P10) (cm)	Fator de diferença
Altura sentado	68,0	72,5	94 %
Altura até os ombros, sentado	43,0	48,3	89 %
Perímetro torácico	59,5	66,0	90 %
Largura da cabeça	12,7	14,1	90 %
Profundidade da cabeça	16,5	18,1	91 %

Tabela 2: Comparação entre as dimensões do boneco construído e o boneco de 10 anos da norma

As placas de chumbo no interior do boneco, foram distribuídas de forma a seguir a distribuição de massas do boneco da norma. No caso dos braços, embora estivessem ausentes, sua massa equivalente foi adicionada às laterais do tórax. Após a instalação desse revestimento interno, a massa total do boneco passou a ser de 22,4 kg, valor este que estava dentro da especificação do P6 (Tabela 3). No entanto, após a instalação da instrumentação e baterias (que será vista mais adiante) e após a aplicação de espuma de poliuretano em seu interior, sua massa total passou a ser de 23,4 kg. Da mesma forma, o conjunto cabeça-pescoço, que tinha uma massa de 3,55 kg, dentro da especificação do P6, após receber uma aplicação de borracha no pescoço, passou a ter 3,7 kg.

Componente	Massa P6 (kg)	Massa P10 (kg)	<i>Dummy</i> simplificado, total final (kg)
Cabeça e pescoço	3,45±0,10	3,60±0,10	3,7
Torso	8,45±0,20	12,3±0,30	19,7
Braços	3,00±0,15	3,60±0,20	
Pernas	7,10±0,25	12,50±0,30	
TOTAL	22,00±0,50	32,00±0,70	23,4

Tabela 3: Distribuição de massas dos bonecos P6 e P10 da norma



Figura 10: Placas de chumbo afixadas por dentro do boneco

3.2 Pescoço do boneco:

O pescoço do boneco é constituído por duas molas helicoidais (Figuras 11 e 12), uma ao lado da outra, o que faz com que o movimento fique mais restrito à extensão e flexão para frente e para trás, atenuando os movimentos de torção e flexão laterais. As molas possuem 9,6 cm de comprimento cada, e em suas extremidades foram colocados adaptadores para permitir a fixação das mesmas à cabeça e ao tronco do boneco por parafusos.



Figura 11: Molas utilizadas no pescoço



Figura 12: Aspecto do boneco com o pescoço (apenas as molas)

Calibração do pescoço: A norma ECE R44 especifica que, para os bonecos de 6 e 10 anos (P6 e P10), o pescoço deve ser calibrado de forma que o bloco da junção Atlas-Axis desça 10 ± 1 mm quando uma carga de 50 N para baixo é aplicada em uma barra ou parafuso que atravesse essa junta (Figura 13). Esse teste deve ser feito com o boneco deitado sobre uma superfície horizontal e o pescoço completo montado no boneco, sem a cabeça.

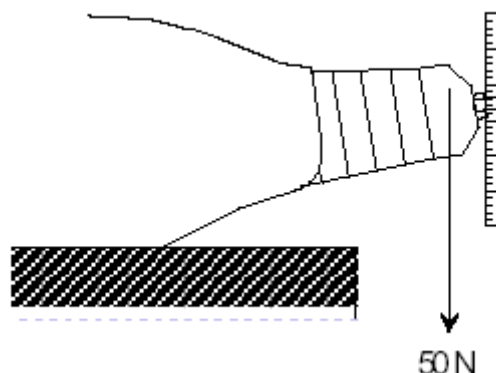


Figura 13: Teste estático do pescoço segundo a ECE R44

Para o boneco simplificado, supondo que a junção Atlas-Axis correspondia aproximadamente à extremidade das molas, aplicamos diferentes pesos ao parafuso da extremidade das molas, e obtivemos, para cada mola os deslocamentos enumerados na Tabela 4.

Peso	Deslocamento(mm)	mm/N
1kg (~10N)	4,6	0,46
2kg (~20N)	8,0	0,40
3kg (~30N)	12,0	0,40

Tabela 4: Teste das molas do pescoço

Esses dados possuem precisão de apenas ± 1 mm. Mesmo assim, foram suficientes para indicar que, para uma solicitação de 25 N em cada mola, e portanto 50 N no pescoço total, o deslocamento é de aproximadamente 10 mm, o que corresponde à calibração mencionada na norma.

Apesar do comportamento estático satisfatório, esse pescoço possuía um problema de oscilação, por falta de amortecimento. A solução foi injetar borracha (de silicone) entre as molas, o que inseriu não apenas uma componente de amortecimento, como também uma resistência à flexão que aumenta quanto maior for o ângulo. Esse comportamento aumenta a similaridade com os *dummies* completos, cujo pescoço é composto por discos metálicos intercalados por borracha.

Para ângulos pequenos, sua resistência estática à flexão não mudou muito, embora não tenha sido possível repetir o ensaio estático acima, já que não foi mais possível desmontar o conjunto "cabeça + pescoço".

3.3 Instrumentação e medidas:

3.3.1 Instrumentação embarcada no boneco:

A instrumentação do boneco foi projetada objetivando ser um sistema que não necessitasse da conexão de cabos externos ao boneco (de alimentação e/ou dados), bem como manter os custos reduzidos. As medidas a serem feitas dentro do boneco são medidas de aceleração (desaceleração).

Numa fase inicial, foi considerada a possibilidade de se utilizar sensores de uso automotivo para esse objetivo. Esses sensores eram do tipo “chave de inércia” (*inertia switch*), ou seja, dispositivos mecânicos que possuíam um contato elétrico que mudava de posição de maneira momentânea ou permanente, quando submetidos a um valor de aceleração para o qual eles tinham sido projetados. Portanto, esses sensores forneciam apenas um critério do tipo “passou ou não passou”, não sendo capazes de medir a aceleração de uma maneira contínua. Mesmo assim eram dispositivos bastante interessantes por serem baratos, não requererem uma eletrônica complexa, nem a conexão de cabos de instrumentação ao boneco.

Contudo, esses dispositivos possuíam algumas desvantagens que desencorajaram sua utilização para esta aplicação: Os modelos disponíveis no mercado eram acionados com valores de aceleração baixos, da ordem de 10 G no máximo, e sua resposta era pouco exata, especialmente para pulsos de curta duração (Figura 14).

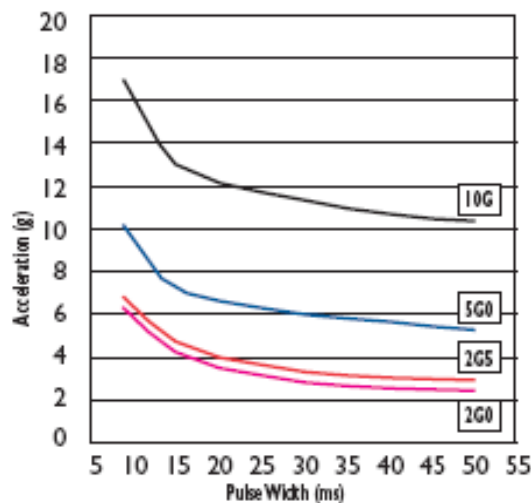


Figura 14: Resposta de sensores mecânicos de aceleração, em relação à largura de pulso (Hamlin, 2006).

Saindo do ramo de componentes automotivos, após uma pesquisa entre os dispositivos existentes no mercado descobriu-se uma alternativa bastante interessante, e de custo reduzido (da ordem de algumas dezenas de dólares), que são os circuitos integrados com acelerômetros. Esses C.I.'s, conhecidos como *micromachined accelerometers* (acelerômetros microfabricados), possuem em seu interior um ou mais transdutores de aceleração altamente miniaturizados, fabricados em Silício, por processos litográficos similares aos já utilizados em microeletrônica. Junto dos transdutores, e dentro do mesmo encapsulamento, há um circuito completo de condicionamento de sinais, inclusive com compensação de temperatura e rotinas de diagnóstico. Portanto, esse componente fornece uma saída analógica “pronta”, com uma tensão linear proporcional ao valor de aceleração e devidamente filtrada em frequência.

Um exemplo é o acelerômetro bi-axial MMA3202D da *Freescale Semiconductor*, escolhido para este trabalho. Esse C.I. mede a aceleração em dois eixos perpendiculares entre si (ambos no plano da placa de circuito). Uma página do fabricante, com suas principais características, pode ser vista no Apêndice 1.

Decidido pelo uso desse circuito integrado, a etapa seguinte consistiu em projetar placas de circuito que utilizassem esse dispositivo, alinhando seu eixo X com a horizontal, e o eixo Y com a vertical do boneco de teste. Essas placas deveriam ser pequenas o suficiente para serem

acomodadas no interior do mesmo, e serem alimentadas por baterias, de forma a não precisar de cabos externos.

Para a instrumentação do boneco, foi decidido medir apenas três eixos de aceleração: os eixos vertical (Z) e horizontal (da trajetória) (X) na altura do tórax, e o eixo da trajetória (X) nas proximidades do centro de gravidade da cabeça. Na medida do tórax foi feita portanto uma aproximação, de que os valores no eixo lateral (direita-esquerda) (Y) seriam bastante pequenos. Já a medida na cabeça, não era requerida na norma, mas foi implementada para efeitos de controle.

As placas de circuitos, associadas aos acelerômetros, foram projetadas com um funcionamento análogo ao dos sensores mecânicos mencionados anteriormente, no sentido de que é detectado se a aceleração passou ou não de determinados valores. Cada saída analógica do C.I. acelerômetro (correspondente a um eixo de medida) é ligada a quatro comparadores eletrônicos. Cada comparador compara a saída do acelerômetro com tensões de referência previamente ajustadas. Caso esses valores de referência sejam ultrapassados em algum instante, o respectivo comparador emite um pequeno pulso, ou seja, um “1” em lógica binária. A saída do comparador está ligada a um *flip-flop*, que atua como memória desse pulso momentâneo, alterando seu estado permanentemente de “0” para “1” quando esse pulso é recebido. Na saída de cada *flip-flop* existe um LED para a indicação visual de seu estado lógico, servindo portanto para indicar se em algum instante o valor da aceleração superou o de referência. Para “zerar” novamente essas leituras, é necessário acionar um contato de “reset” (que retorna os *flip-flops* ao estado inicial), ou então desligar a energia do circuito.

Para a indicação dos valores detectados, o boneco possui um painel com três escalas de quatro LEDs cada, cada uma correspondente a um eixo de aceleração medido (Figura 16). As escalas indicam uma faixa que vão de 50 % até 100 % de um valor-limite. Há ainda um indicador independente das escalas, apenas para indicar que o circuito está ligado e funcionando.

Para o eixo X do tórax, o valor-limite adotado foi de 55 G, que era o limite da aceleração resultante no tórax estabelecido pela norma, ou seja, partiu-se da suposição que essa deverá ser a

principal componente da resultante (pois o circuito não era capaz de calcular esse vetor). Para o eixo Z do tórax, o valor-limite adotado foi de 30 G, como descrito pela norma. Já para o eixo X da cabeça, como não havia uma especificação na norma, foi arbitrado um limite de 100 G, para fins de controle. As escalas ficaram portanto conforme a Tabela 5:

Aceleração detectada (G's)			LED indicador
X (tórax)	Z (tórax)	X (cabeça)	
$\geq 55,0$	$\geq 30,0$	$\geq 100,0$	4-Vermelho
$\geq 45,8$	$\geq 25,0$	$\geq 83,3$	3-Verde
$\geq 36,7$	$\geq 20,0$	$\geq 66,7$	2-Verde
$\geq 27,5$	$\geq 15,0$	$\geq 50,0$	1-Verde

Tabela 5: Valores indicados pelo painel

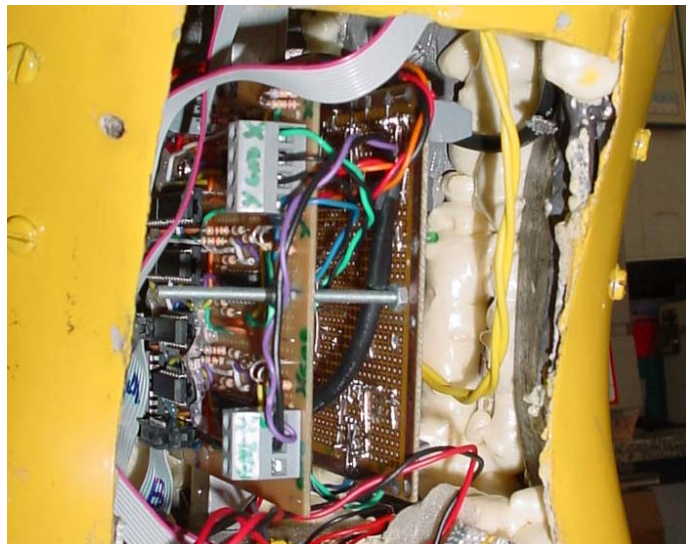


Figura 15: Placas de circuitos, vistas pelas costas do boneco

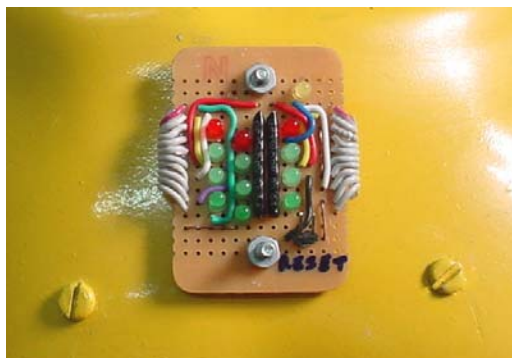


Figura 16: Painel frontal

A alimentação de toda essa eletrônica embarcada (Figura 15) é feita utilizando duas baterias recarregáveis do tipo Ni-Mh de 9 Volts, de tamanho convencional, que possuem fácil disponibilidade no mercado e custo reduzido. Utilizando duas baterias de 160 mAh, a autonomia é de cerca de duas horas.

Conforme a norma ISO 6487 citada pela NBR 14400, as saídas dos acelerômetros precisam obedecer a uma classe de filtragem em frequência (CFC - *channel filter class*), conforme consta no Anexo 2.

Os C.I.'s já possuíam uma saída limitada por um filtro passa-baixa do tipo Bessel, de quarta ordem, com frequência de corte de 400 Hz. Para uma melhor adequação às especificações, foi adicionado à saída de cada acelerômetro do tórax, um filtro passa-baixa do tipo Butterworth, de segunda ordem, com frequência de corte em 297 Hz. Isso resultou, pela superposição ao filtro já existente, em um resultado próximo do requerido, com uma frequência de corte próxima de 300 Hz.

Para os acelerômetros da cabeça (medida que não é exigida na NBR 14400), a frequência de corte teria que estar próxima de 1650 Hz, o que não era possível por causa do filtro de 400 Hz já existente. Independentemente disso, foi adicionado à sua saída um filtro em 913 Hz, apenas para melhorar a imunidade a ruídos.

Esses filtros foram projetados como filtros ativos de ganho unitário, implementados com a arquitetura *Sallen-Key* (Figura 17), a qual utiliza amplificadores operacionais associados a resistores e capacitores. Embora tenham sido implementados filtros de segunda ordem, que têm um decaimento relativamente lento (Figura 18), deve-se lembrar que eles atuam em conjunto com os filtros de quarta ordem já existente nos C.I.'s.

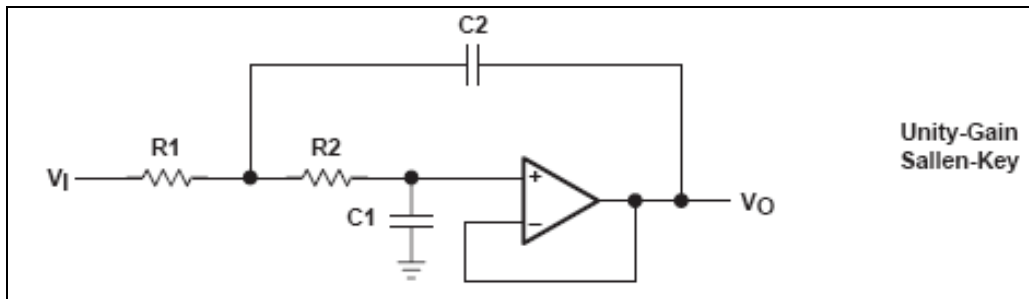


Figura 17: Filtro Sallen-Key de ganho unitário (Karki, 2000)

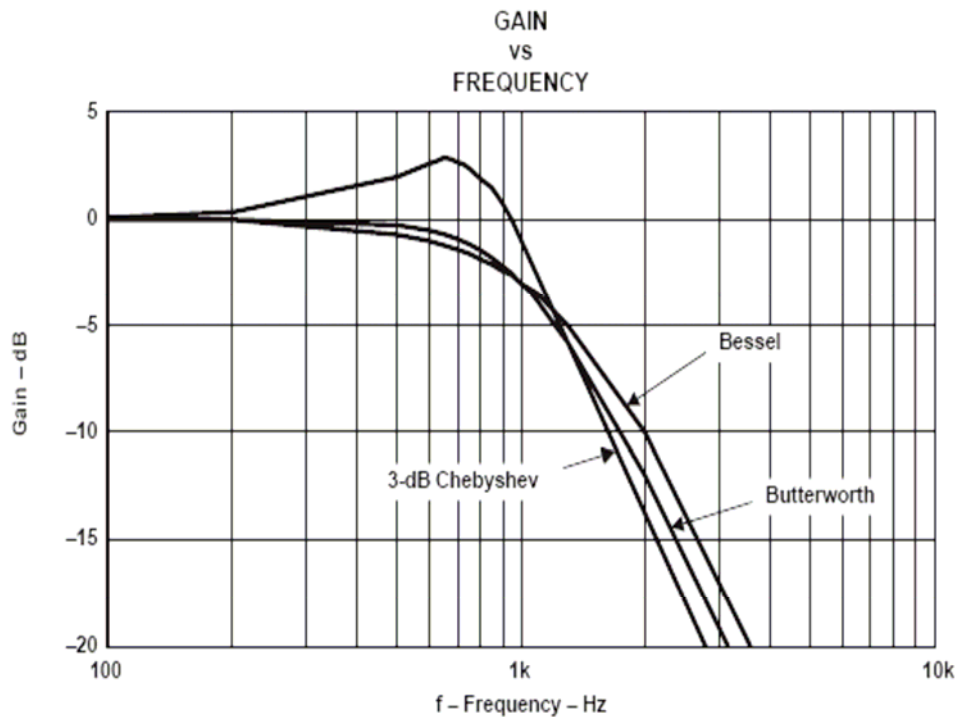


Figura 18: Característica de filtros de segunda ordem, num exemplo de 1khz (Karki, 2000)

Outro detalhe dos requerimentos da norma é a especificação de intervalos iguais ou maiores que três milissegundos, para as desacelerações detectadas. Isso não foi possível de implementar

neste circuito, pois ele precisaria não apenas detectar se as saídas dos acelerômetros ultrapassaram determinados valores, como foi feito, mas também medir por quanto tempo isso ocorreu (se foi um tempo maior ou igual a três milissegundos). Mesmo sem isso, ainda houve alguma limitação quanto à largura mínima de pulso, imposta pelos filtros passa-baixa presentes.

Placas de circuito mais completas, que ficam como sugestões para estudos futuros (por questões de tempo e material), são placas que utilizem recursos computacionais, e dessa forma possam obter gráficos da aceleração ao longo do tempo, além de permitir cálculos matemáticos mais elaborados, tais como o do vetor da aceleração resultante, e das integrais em diferentes intervalos de tempo. Para se ter esse tipo de sofisticação, e ainda assim manter o circuito dentro do boneco sem cabos, duas soluções são sugeridas:

- a) Utilizar um microcontrolador ou microprocessador programável, que processe e armazene os dados em sua memória.
- b) Montar um pequeno sistema de telemetria, transmitindo os dados diretamente para um computador por rádio-frequência.

3.3.2 Medida do deslocamento da cabeça

Decidiu-se por realizar essa medida externamente ao boneco. Existem diferentes maneiras para a realização desta, variando conforme a disponibilidade de recursos e instrumentos:

- a) Pela interpretação de imagens (vídeos). A interpretação pode ser feita visualmente ou com recursos computacionais. Essas imagens devem ser obtidas com câmeras de alta velocidade, que proporcionem altas taxas de quadros por segundo. Câmeras de vídeo convencionais também podem ser utilizadas, mas fornecem dados mais escassos.
- b) Com a instalação de barreiras físicas (anteparos) nos limites de deslocamento permitido, de forma que a cabeça do boneco colida com elas caso os limites sejam ultrapassados. Nesse caso as barreiras devem ser construídas de forma que não danifiquem o boneco caso haja o contato.
- c) Utilizando um potenciômetro do tipo “molinete”, que é um transdutor de deslocamento que possui um cabo retrátil, e um valor de resistência elétrica que varia conforme a quantidade de cabo desenrolada. O potenciômetro pode por exemplo ser

fixado ao carrinho de ensaio atrás do boneco, com a ponta do cabo presa à cabeça do mesmo.

- d) Utilizando acelerômetros na cabeça do boneco e fazendo a integração dupla desses valores para se obter o deslocamento (embora seja difícil produzir bons resultados por esse método).

Para este trabalho, foi escolhido o método de análise de vídeo, devido à disponibilidade desse equipamento nos locais em que os testes foram realizados.

3.3.3 Medida da penetração abdominal

Outro requisito colocado pela norma NBR 14400, é a medida da penetração na “massa moldável” da região abdominal do boneco de ensaio. Infelizmente o boneco simplificado, bem como o *dummy* completo disponível para ensaio, não possuíam essa massa moldável. Ainda segundo a norma, poderia ser utilizado um (sic) “filme de bolhas” especificado na norma britânica BS 3254-2, colocado sobre a região abdominal. Embora nenhum dispositivo desse tipo tenha sido utilizado neste trabalho, existem no mercado diferentes dispositivos que podem ser utilizados para realizar essa medida. Alguns desses dispositivos estão descritos no Apêndice 2.

3.4 Análise de custos

Os custos de materiais para a construção do boneco, bem como de sua adaptação, ficaram em cerca de trezentos reais. Os materiais de revestimento (chumbo e espuma), bem como os materiais empregados no pescoço (molas e borracha), acrescentaram mais cem reais. A parte eletrônica, incluindo o custo de componentes, cabos e baterias, também ficou em cerca de trezentos reais. Somando-se estes valores, resulta em aproximadamente setecentos reais.

Embora essa seja uma análise superficial, e esteja incluindo quase que exclusivamente os materiais e componentes utilizados, ela permite estimar que o custo de fabricação de um boneco como esse deva ser um pouco maior, mas ainda da ordem de pouco mais de mil reais, valor consideravelmente inferior ao preço de um *dummy* completo, instrumentado ou não.

3.5 Ensaios de impacto

O boneco construído foi submetido a dois testes de impacto. Por se tratar de um primeiro protótipo de *dummy* simplificado optou-se por realizar inicialmente um teste que utilizasse uma velocidade reduzida, com o objetivo de avaliar o comportamento da fixação da eletrônica embarcada em relação ao corpo do boneco, das medições obtidas, e de seu comportamento mecânico de um modo geral. Após esse teste, partiu-se para o ensaio padrão da norma, no qual o boneco foi ensaiado lado-a-lado com um *dummy* completo, permitindo uma comparação entre seus desempenhos.

3.5.1 Teste de baixa velocidade

O ensaio de baixa velocidade foi realizado no dia 29 de maio de 2006 nas instalações do CESVI Brasil. Esse tipo de ensaio costuma ser realizado por seguradoras, para simular pequenas colisões urbanas a fim de se analisar o custo de reparo de um veículo. A velocidade utilizada é de 15 km/h.

No ensaio realizado, foi utilizado um automóvel de médio porte, para colidir contra uma barreira rígida que estava posicionada com um *offset* de 40% para o lado esquerdo do veículo. O motivo desse *offset* era o ensaio de reparabilidade da parte dianteira do veículo, que estava sendo realizado em paralelo. O teste foi monitorado por câmeras de vídeo convencionais (ou seja, que não eram de alta velocidade), e para uma melhor visualização do movimento dos bonecos, o veículo estava sem suas portas traseiras.

O *dummy* simplificado construído, foi instalado em uma cadeirinha certificada pelo INMETRO, no assento direito do banco de trás. Para fins de controle, e também para ilustrar a importância do uso da cadeirinha (já que o teste estava sendo acompanhado pela imprensa), foi colocado no assento esquerdo do banco de trás um outro boneco, sem utilizar nenhum dispositivo de retenção. Esse boneco era similar ao boneco construído, mas não possuía cabeça nem partes eletrônicas, e pesava 20,5 kg.

Por meio dos resultados fornecidos por esse teste, como o deslocamento do boneco visto no vídeo e o resultado indicado no painel do boneco, além de uma avaliação do estado do boneco após o impacto, foi possível decidir se o boneco estava apto para o teste padrão da norma, que envolveria um impacto bem mais violento.

3.5.2 Teste de alta velocidade

Foi realizado no dia 24 de julho de 2006, no Campo de Provas da Cruz Alta, da General Motors do Brasil, um ensaio do tipo "carroceria de veículo sobre carrinho de ensaio", configurado segundo as especificações da norma NBR 14400.

Nesse tipo de teste, uma carroceria de veículo é instalada sobre uma plataforma (carrinho de ensaio), que é acelerada até a velocidade de 50 km/h e segue até atingir um sistema de absorção de impacto composto por pistões configuráveis, os quais proporcionam um pulso de desaceleração o mais próximo possível do especificado na norma.

No banco traseiro da carroceria, foram instaladas duas cadeirinhas certificadas, da mesma marca e modelo. A cadeirinha do lado direito foi ocupada pelo *dummy* simplificado, e a cadeirinha do lado esquerdo foi ocupada por um *dummy* Hybrid III 6Y, equivalente a uma criança de 6 anos, cujas características biomecânicas se equivalem às do modelo TNO P6 previsto na norma.

As cadeirinhas eram de um modelo normalmente comercializado para crianças de até 18kg (Grupo I), mas elas já tinham sido ensaiadas até 25kg (Grupo II), o que viabilizou sua utilização nesse teste. Enquanto o *dummy* simplificado, com seus 23,4 kg, estava dentro desse grupo de massa, o boneco Hybrid III, com seu chicote de cabos para instrumentação, pesava um pouco mais, cerca de 27 kg.

O laboratório dispunha de câmeras de alta velocidade para a obtenção das imagens, bem como um sistema capaz de interpretar essas imagens e obter o deslocamento das cabeças dos

bonecos de forma gráfica e numérica. Esses gráficos são produzidos por meio de um programa de computador, que é capaz de acompanhar o movimento das marcas de referência (também chamadas de “miras”) ao longo do tempo. Essas marcas são previamente afixadas às cabeças dos bonecos, e também aos veículos (Figura 19), de forma a permitir o cálculo do deslocamento relativo da cabeça em relação ao veículo por comparação, uma vez que ambos se deslocam em relação às câmeras (não embarcadas no veículo).



Figura 19: Destaque da localização das marcas de referência.

Havia também um sistema de aquisição de dados, que permitiu a realização das medidas necessárias, desde o pulso de desaceleração do veículo até as acelerações detectadas pelo boneco Hybrid III, entre outras.

Por meio dos resultados deste teste, foi possível fazer uma comparação entre o desempenho dos dois bonecos, de forma a validar a proposta do boneco construído.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Ensaio de baixa velocidade

Foi realizado o impacto do veículo, e após o mesmo era possível constatar que o *dummy* simplificado tinha permanecido devidamente retido pela cadeirinha, e o conjunto não tinha sofrido nenhum dano importante. No painel frontal do boneco, permanecia aceso apenas o indicador de que o circuito estava ligado e operacional. Os indicadores de aceleração não se acenderam, o que significa que os valores detectados ficaram abaixo das escalas, as quais tinham sido dimensionadas para impactos a 50 km/h.

As imagens captadas pelas câmeras, apesar de taxa baixa de quadros por segundo (taxa convencional de TV), permitiram visualizar a movimentação do boneco durante o impacto (Figura 20). O deslocamento da cabeça ocorreu dentro dos limites da norma, com uma excursão para a frente estimada em cerca de 38 cm, em relação à posição inicial (Figura 21). Contudo, o pescoço do boneco se flexionou a ponto de o queixo tocar a parte superior do tórax, o que não era esperado em um impacto em baixa velocidade, pois imaginava-se que o pescoço seria rígido o suficiente para suportar melhor as forças envolvidas, que foram relativamente baixas.

Embora o deslocamento da cadeirinha e do boneco tenham sido satisfatórios, houve uma falha na instalação da cadeirinha, que a levou a ir mais para a frente do que deveria: existe um

clip tipo "H" que deveria ter sido instalado nas tiras do cinto do veículo, para a correta fixação da cadeirinha, mas este foi omitido. Contudo, o efeito da falta do clip foi atenuado pelo fato de o veículo possuir um retrator de cinto com um sistema de trava tensionadora chamado KISI, específica para proporcionar uma melhor fixação de dispositivos de retenção infantil.



Figura 20 (a - f): Comportamento do boneco e da cadeirinha com o impacto



Figura 21: Deslocamento da cabeça do boneco

Enquanto esse boneco foi protegido pela cadeirinha durante o impacto, o outro, que estava solto, teve um comportamento totalmente diferente. Com a parada do veículo, o boneco solto continuou sua trajetória para a frente até colidir com o banco dianteiro. A reação do banco dianteiro jogou o boneco de volta para trás e, como a porta traseira não estava instalada, ele acabou caindo para fora do veículo (Figuras 22 e 23), sofrendo um pequeno dano na região do ombro direito, devido ao impacto com o solo.



Figura 22 (a - d): O boneco solto colide com o banco da frente...



Figura 23: ... e depois cai para fora do veículo

4.2 Ensaio em alta velocidade (velocidade padrão da norma)

Antes do impacto era possível se observar que, mesmo sendo as cadeirinhas iguais, e ambas instaladas de maneira igualmente correta, o *dummy* simplificado estava com o tronco e a cabeça

um pouco mais inclinados para trás do que o Hybrid III, e ele estava em uma posição ligeiramente mais alta, como pode ser visto na Figura 24.



Figura 24: Disposição dos bonecos antes do teste

Prosseguindo com o teste, foi feito o impacto, e após o mesmo, ambos os bonecos permaneceram retidos pelas cadeirinhas. O *dummy* simplificado sofreu danos no pescoço: na altura do primeiro elo das molas após a fixação no tronco: a mola esquerda quebrou e a direita sofreu deformação permanente. O dano no pescoço fez com que ele se alongasse mais do que era esperado, durante o impacto. Isso permitiu que o queixo do boneco colidisse violentamente com o tórax, num ponto mais baixo do que o esperado, atingindo o painel indicador frontal que ali se encontrava (Figura 25). O painel ficou seriamente danificado, impedindo a leitura visual de suas escalas. Mesmo assim ainda foi possível recuperar a informação, que deveria estar ali indicada, com a ajuda de um multímetro.



Figura 25 (a e b): Danos ao pescoço e ao painel

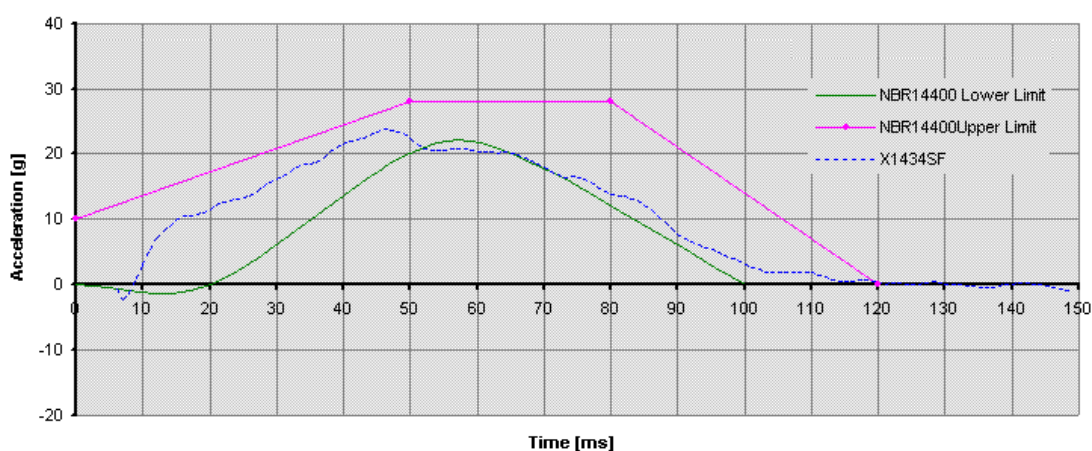


Figura 26: Desaceleração da carroceria

O dispositivo de desaceleração do carrinho de ensaio tinha sido programado para produzir um pulso de acordo com a especificação da norma NBR 14400, o que de fato ocorreu, como pode ser visto na Figura 26.

Nas sequências de imagens (Figuras 27 e 28), é possível verificar o comportamento de ambos os bonecos durante o impacto. Nota-se que o deslocamento máximo da cabeça do *dummy* simplificado ocorre próximo de 110 milissegundos de impacto. Até esse momento, o comportamento de ambos os bonecos é muito semelhante, inclusive quanto à flexão do pescoço. Depois disso, o *dummy* simplificado já começa a retornar. O boneco Hybrid III continua seguindo para a frente, com sua excursão máxima da cabeça registrada em cerca de 150 milissegundos, com uma acentuada flexão do quadril, que levou a cabeça a se aproximar das pernas.

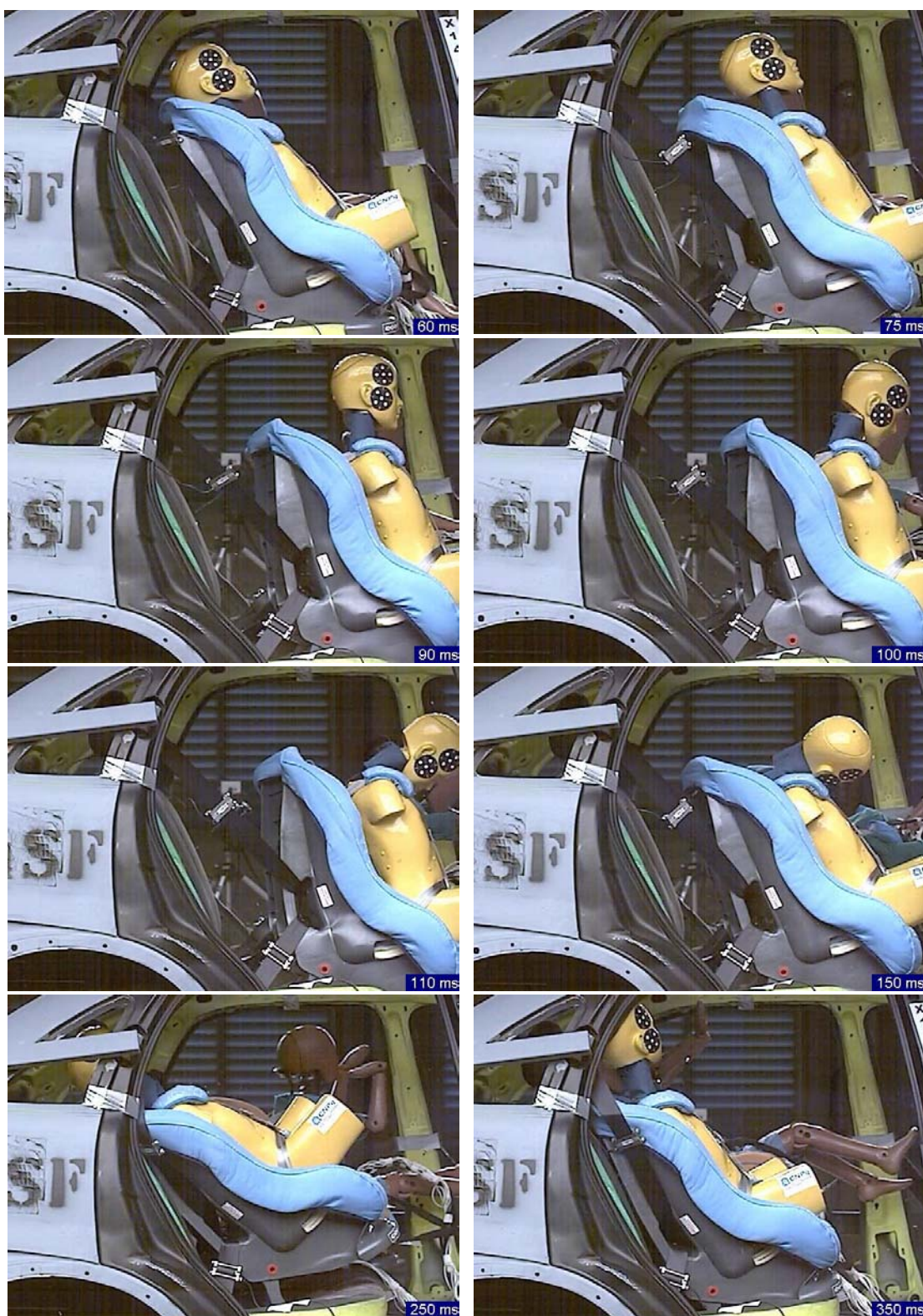


Figura 27 (a - h): Sequência de imagens mostrando o movimento do boneco construído

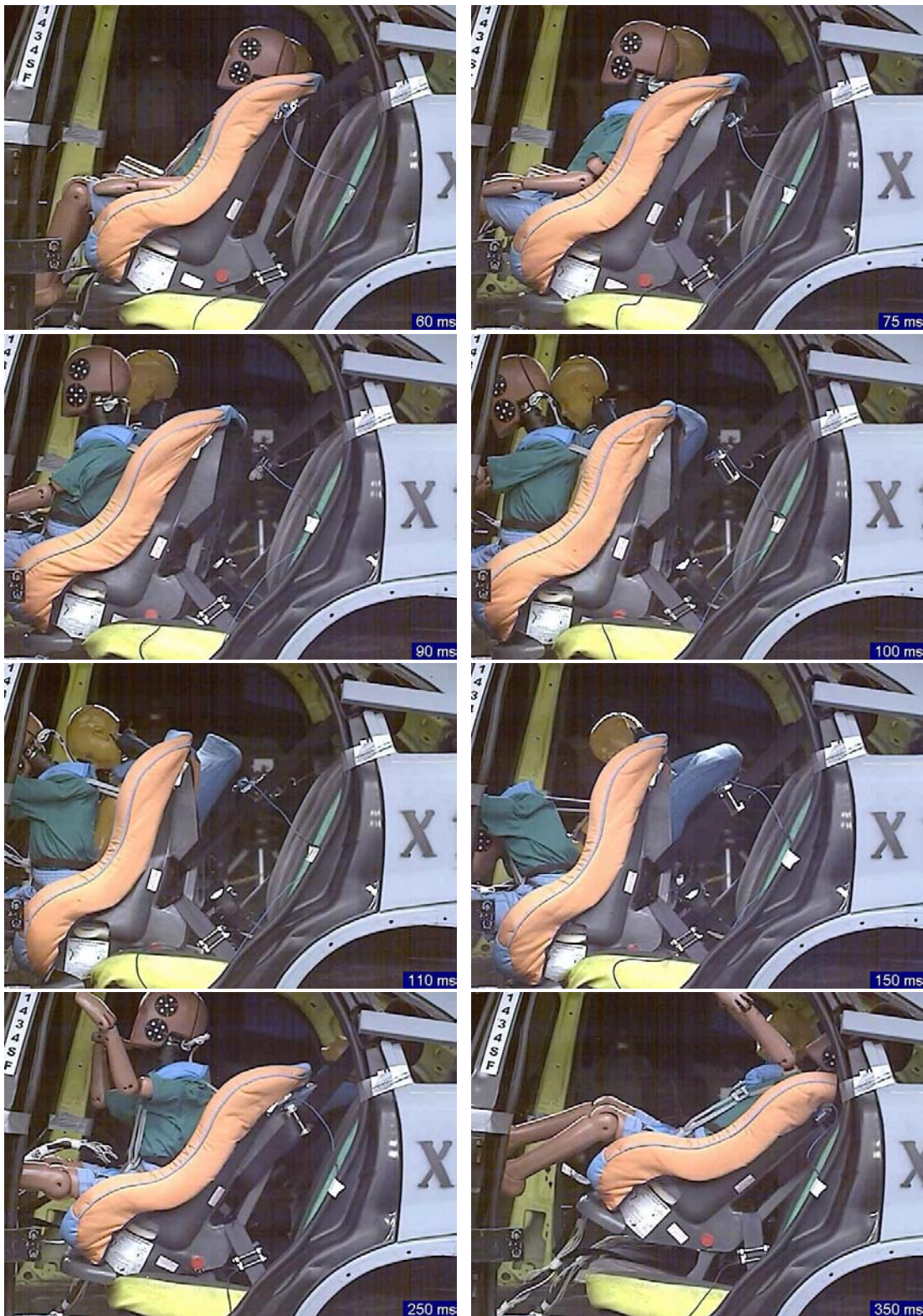


Figura 28 (a - h): Sequencia de imagens mostrando o movimento do boneco Hybrid III

A partir das imagens de vídeo, foi possível obter os gráficos de deslocamento das cabeças dos bonecos (Figuras 29 e 30).

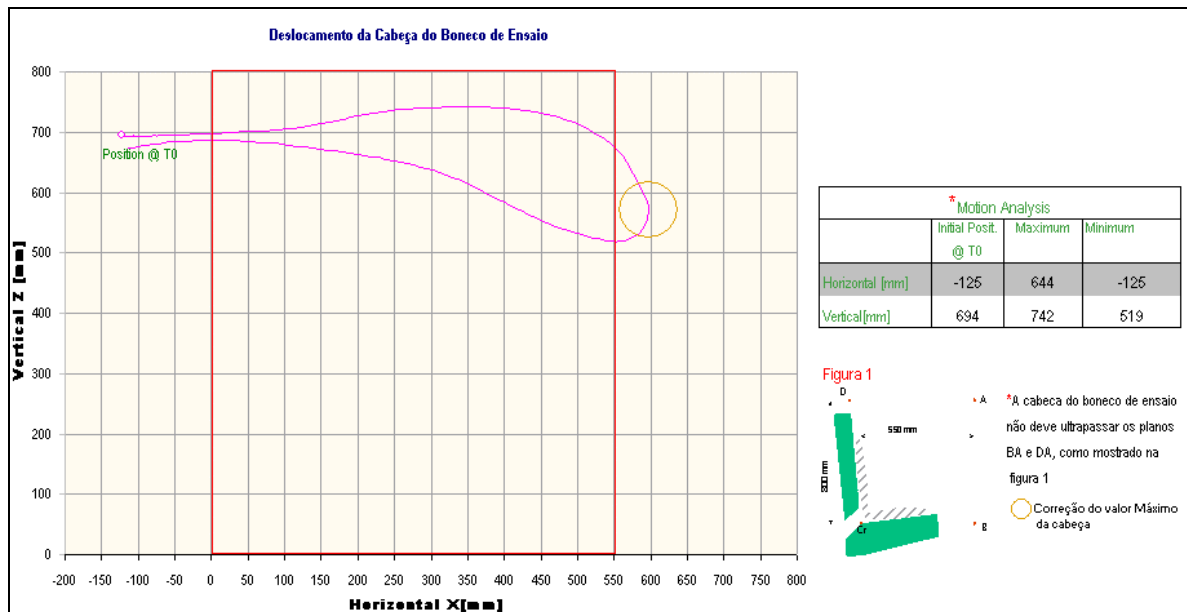


Figura 29: Deslocamento da cabeça do dummy simplificado

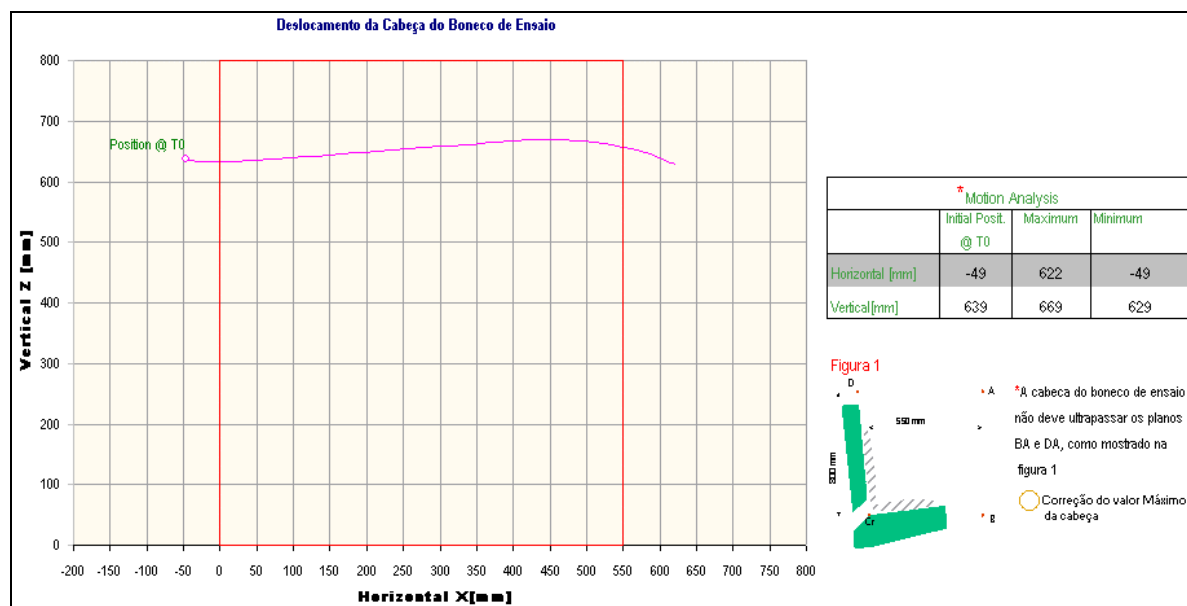


Figura 30: Deslocamento da cabeça do Hybrid III

Ambos os bonecos ultrapassaram o limite horizontal estabelecido pela norma, por alguns centímetros. O gráfico para o *dummy* simplificado indica que ele passou menos do limite que o outro *dummy*, mas também indica que sua posição inicial estava um pouco mais para trás

(embora o limite da norma seja em relação ao veículo). O gráfico para o Hybrid III ficou interrompido porque sua cabeça em certo momento ficou encoberta pela coluna do veículo, e a partir disso o software não conseguiu mais seguir sua trajetória. No entanto, as imagens sugerem que, não fosse essa limitação, o deslocamento registrado no gráfico teria sido ainda maior.

As desacelerações detectadas pelo *dummy* Hybrid III ficaram todas dentro dos limites estabelecidos pela norma, como pode ser visto na Figura 31.

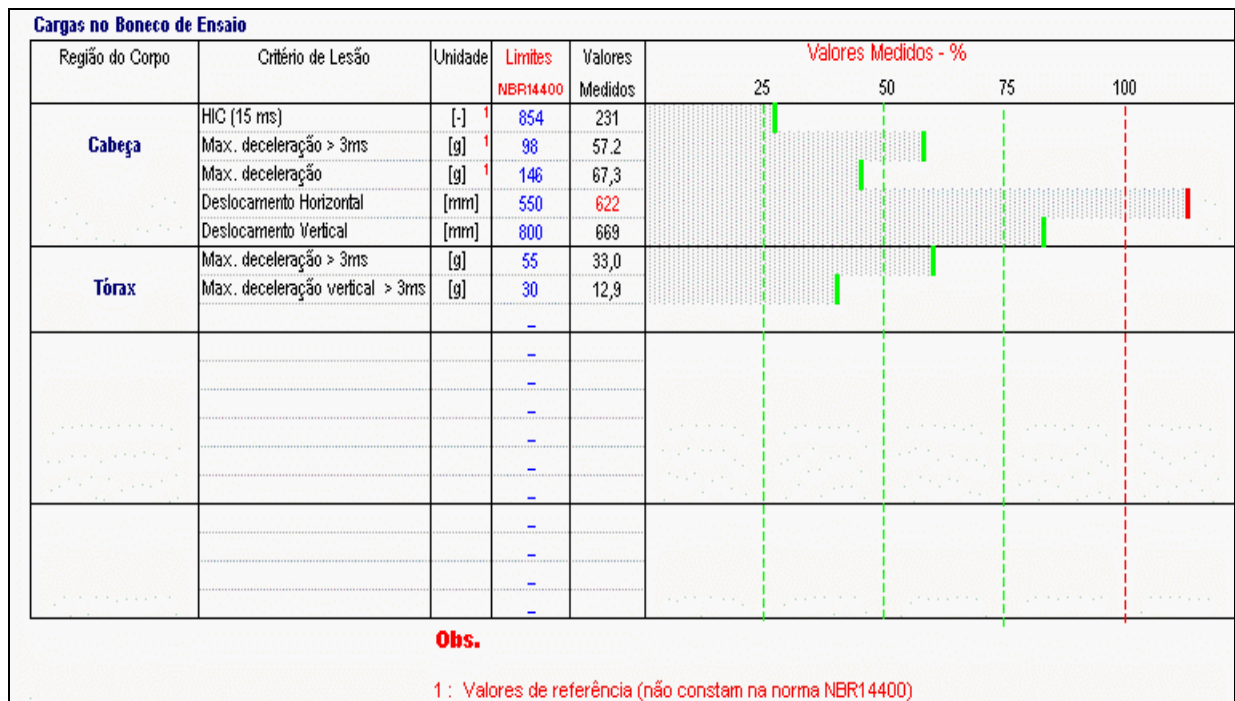


Figura 31: Tabela e gráfico com as desacelerações detectadas no Hybrid III

As desacelerações detectadas pelo *dummy* simplificado, também ficaram dentro dos limites estabelecidos pela norma. A leitura obtida do painel, na forma de intervalos, pode ser conferida na Tabela 6.

LED	Eixo de medida		
	Tórax		Cabeça
	X (horizontal)	Z (vertical)	X (horizontal)
4 (vermelho)	não	Não	não
3 (verde)	não	Sim	não
2 (verde)	sim	Sim	não
1 (verde)	sim	Sim	sim
Aceleração (G) (intervalos)	[36,7; 45,8]	[25; 30]	[50; 66,7]
Limite NBR 14400	55 (resultante)	30	n/d

Tabela 6: Leitura do painel do dummy simplificado

Medida	Dummy simplificado	Comparação	Hybrid III 6Y (>3ms)
Desaceleração no tórax (G)	[36,7; 45,8] (somente eixo X)	>	33,0
Desaceleração vertical no tórax (G)	[25; 30]	>	12,9
Desaceleração na cabeça (G)	[50; 66,7] (somente eixo X)	=	57,2

Tabela 7: Comparação entre as desacelerações medidas pelos bonecos.

Capítulo 5

Discussão dos Resultados

5.1 Ensaio de baixa velocidade

O impacto a apenas 15 km/h não fez com que nenhum indicador de aceleração se acendesse no boneco. Isso era esperado, uma vez que a velocidade do teste foi bem menor que a velocidade de 50km/h do teste padrão de cadeirinhas, mais precisamente 30% dessa velocidade. Como a energia cinética varia em função do quadrado da velocidade, então o veículo precisou absorver uma energia igual a apenas 9% da energia que seria dissipada caso a colisão fosse a 50km/h. Logo, as forças envolvidas e as acelerações também foram bastante reduzidas. Mesmo não tendo sido feita a medida do pulso de desaceleração no veículo, pode-se deduzir que os valores foram baixos. Inclusive, segundo opinião dos funcionários da CESVI ali presentes, o veículo utilizado, não apenas pelo seu porte mas também pela tecnologia empregada, possuía uma excelente absorção de impactos pequenos.

A captação de imagens por câmeras de vídeo convencionais se demonstrou suficiente neste caso, apesar do pouco detalhamento do movimento dos bonecos durante o impacto. Para monitorar impactos a velocidades mais altas, um sistema de câmeras de alta velocidade far-se-ia necessário.

Não era esperado, para um impacto a apenas 15 km/h, que o queixo do boneco tocasse o tórax. Considera-se que uma das principais causas para isso tenha sido o fato de o boneco possuir uma caixa torácica rígida. Como comparação, em um *dummy* completo o tórax possui costelas, as quais sofreriam deformação por compressão em situações como essa. Com essa deformação, haveria um menor movimento relativo entre a cabeça e a caixa torácica, o que faria com que o pescoço fosse menos solicitado.

A presença do outro boneco, sem retenção, serviu para ilustrar a importância de se reter as crianças adequadamente, e os riscos aos quais uma criança solta está sujeita, mesmo em impactos de baixa velocidade. No caso de uma colisão real, não apenas a criança, como também o adulto que estivesse no banco da frente, poderiam ter sofrido lesões sérias.

Adicionalmente, foi possível perceber que o boneco construído, e até mesmo o outro que não tinha cabeça, foram bastante convincentes para as pessoas, como algo que representava uma criança. Esse é um dado subjetivo porém importante. Uma boa identificação visual auxilia, por exemplo, na conscientização das pessoas que vejam as imagens do teste.

5.2 Ensaio de alta velocidade

A diferença na acomodação dos bonecos, verificada antes do teste, foi causada principalmente porque o *dummy* simplificado possuía uma maior curvatura na região lombar, imperfeição adquirida do boneco a partir do qual sua construção foi feita. Outro fator que pode ter contribuído para isso foi o ângulo fixo do quadril, que em algumas cadeirinhas poderia dificultar a acomodação do boneco, pela ocorrência de apoio das coxas na ponta do assento, quando o ângulo de assento da cadeirinha era mais fechado que o do boneco.

A análise das imagens do impacto, indicou que o boneco Hybrid III foi o que mais se deslocou para a frente. Essa diferença foi ocasionada por dois fatores principais: no boneco Hybrid III, seu peso maior solicitou mais a cadeirinha e a fixação, enquanto no *dummy* simplificado, seu quadril em ângulo fixo limitou a inclinação do tronco para a frente.

Durante o retorno para trás, era possível observar que a cabeça do *dummy* simplificado se movimentava para os lados. Isso aconteceu em consequência da ruptura de uma das molas do pescoço, conforme já descrito. Essa ruptura ocorreu próximo do instante em que o queixo do boneco colidiu com o tórax, na região de máximo deslocamento da cabeça no gráfico. Antes disso ocorrer, era possível notar que as cabeças dos bonecos se inclinavam para a frente de maneira muito semelhante entre si ao longo do tempo, um resultado bastante positivo.

O problema ocorrido com o pescoço indica que sua estrutura precisa ser melhor estudada, não apenas se baseando no teste estático mencionado na norma, mas também procurando compensar outros fatores como as maiores solicitações causadas pela rigidez da caixa torácica. Um cabo que limitasse a extensão do pescoço, reduziria as chances de dano como o que ocorreu.

O quadril do boneco, sendo fixo, também se mostrou como um fator limitante. Um ângulo um pouco mais fechado poderia apresentar melhores resultados. Esse ângulo precisaria ser mais cuidadosamente estudado, levando em conta o formato do tronco e coxas do boneco, bem como os ângulos de assento das cadeirinhas já existentes.

As acelerações medidas com o boneco construído, indicaram um bom aproveitamento das escalas, ou seja, a escolha das faixas de valores a serem cobertas pelas escalas foi bastante adequada. Apesar das aproximações impostas pela simplicidade do circuito, os resultados foram bastante próximos dos obtidos com o *dummy* completo. Os valores um pouco mais altos detectados no tórax, podem ser explicados pelo fato do mesmo ser rígido, sem a absorção proporcionada pelo conjunto de costelas existentes no boneco completo.

Os resultados obtidos pelos bonecos indicaram que ambas as cadeirinhas não passaram no teste, por causa do deslocamento excessivo da cabeça para a frente.

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

O boneco projetado e construído neste trabalho, apresenta as características básicas de biofidelidade, isto é, possui dimensões e massas bastante próximas às de um *dummy* completo, sendo portanto similar a uma criança da respectiva idade.

A construção do boneco é passível de ser realizada com custo significativamente inferior a de um boneco instrumentado completo.

A eletrônica totalmente embarcada no boneco, e alimentada por baterias de baixo custo e pequeno porte, sem conexões externas, facilita o traslado do mesmo para ensaios em diferentes locais e até mesmo em condições adversas. A instrumentação, que recorre a circuitos eletrônicos dedicados aos quais estão incorporados acelerômetros, apresenta bom desempenho tanto em termos de fixação e rigidez para suportar os impactos, quanto no registro das desacelerações medidas. A escala de graduação dos níveis de desaceleração apresenta um bom índice de acerto, e permite por meio de um registro visual estimar o desempenho do dispositivo de retenção para crianças.

Uma sugestão para próximos trabalhos é a construção de um boneco com uma biomecânica mais aprimorada, que tenha por exemplo os braços e pernas articulados, e que possua medidas externas mais precisas e simétricas se comparadas ao *dummy* completo. Também seria

interessante projetar uma eletrônica mais elaborada no interior do boneco, de forma a permitir medir mais eixos de aceleração, com maior detalhamento e precisão. Esse boneco, mais complexo, teria um custo maior, mas ao se confrontar os dados com o deste estudo, seria possível avaliar em quanto o custo extra se traduziu em melhores resultados finais.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-14400**: veículos rodoviários – dispositivos de retenção para crianças – requisitos de segurança. Rio de Janeiro, 1999. 49p.

ECONOMIC COMMISSION EUROPE. **ECE R44.03**: uniform provisions concerning the approval of restraining devices for child occupants in power-driven vehicles. United Nations, 2000. 130p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6487**: road vehicles – measurement techniques in impact tests – instrumentation. Switzerland, 1987. 6p.

BRASIL. Lei Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. **Institui o Código de Trânsito Brasileiro**. Disponível em: http://www.denatran.gov.br/ctb_compilado.htm . Acesso em 13/5/2006.

SMRCKA, J. **Dummies: Past & Present**. First Technology Safety Systems. Plymouth, 2001. Disponível em: www.ftss.com/historybook.cfm . Acesso em 2/12/2005.

HISTORY of Crash Test Dummies. First Technology Safety Systems. Plymouth, 2005. Disponível em: <http://www.ftss.com/history.cfm> . Acesso em 2/12/2005.

MINISTÉRIO DA SAÚDE - DATASUS. **Dados sobre acidentes, faixa etária de 0 a 14 anos**. Disponível em: http://www.criancasegura.org.br/dados_acidentes_0_14.asp . Acesso em 13/5/2006.

- NAHUM, A. M; MELVIN, J. W. **Accidental Injury – Biomechanics and Prevention**. New York: Springer-Verlag, 1993. cap. 2, 4 e 19
- WEBER, K. Crash Protection for Child Passengers: A Review of Best Practice. **UMTRI Research Review**. Michigan: University of Michigan, 2000. v.31. n.3.
- ROMARO, M. **Comportamento dos Cintos de Segurança Infantis em Impactos Veiculares**. 2005. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 51p.
- SEDRA, A. S; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. Tradução da 4^a. edição americana. São Paulo: MAKRON Books, 2000, 1270p.
- SEIFFERT, U; WECH, L. **Automotive Safety Handbook**. EUA, SAE International, 2003, 283p.
- HALLIDAY, D; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. v.1. cap. 7 e 8.
- MARCONDES, E. **Pediatria Básica**. - 8. ed. – São Paulo: Sarvier, 1991. p. 35-52.
- DIMÉGLIO, A. **Growth in Pediatric Orthopaedics**. In: LOVELL, W. W; WINTER, R. B. **Pediatric Orthopaedics**. Philadelphia: Lipincott W & W, 2001, 5 ed. V.1 cap. 2
- IRWIN, A. L.;MERTZ, H. J. **Biomechanical Bases for the CRABI and Hybrid III Child Dummies**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1997. Paper number 973317.
- ONO, Y. Et alli. **Child Restraint System Assesment Program in Japan**. Japan: Japan Automobile Research Institute, 2003. 11p. Paper Number ID241
- KARKI, J. **Active Low-Pass Filter Design**. Texas Instruments Application Report, EUA, Outubro de 2000.

HAMLIN. **HSS Shock Sensor Features and Benefits.** Disponível em:
<http://www.hamlin.com/images/upload/ByCatalogue/pdf/HSS.pdf> . Acesso em 21/09/2006.

TEKSCAN. **Informações de produtos.** Disponível em <http://www.tekscan.com> . Acesso em 21/09/2006.

SENSOR PRODUCTS LLC. **Tactile Pressure Indicating Sensor Film.** Disponível em:
<http://www.sensorprod.com/pdf/pre.pdf> . Acesso em 21/09/2006.

FREESCALE SEMICONDUCTOR. **Sensors.** Disponível em:
<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/homepage.jsp?nodeId=011269&tid=FSH> .
Acesso em: 21/09/2006.

Apêndice A

Exemplo de ensaio de impacto simplificado

A utilização de um *dummy* simplificado como o que foi construído, representa uma importante economia de custos para ensaiar uma cadeirinha quando seu uso é associado a um método simplificado de ensaio de impacto.

Um exemplo de método simples para testes de impacto consiste em realizar testes verticais, que utilizem a gravidade terrestre como meio de aceleração. Nesse caso a aceleração ocorre pela transformação de energia potencial (mgh) em energia cinética ($mv^2/2$). Esse tipo de teste não é previsto na norma NBR 14400, mas pode ser considerado como uma aproximação dos testes horizontais nela previstos, desde que sejam levadas em conta as diferenças decorrentes do fato de o boneco e a cadeirinha ficarem voltados para baixo (no sentido da trajetória de queda).

Esse teste pode utilizar a mesma velocidade final (imediatamente anterior ao impacto) prevista na norma, que é de 50 km/h, ou 13,89 m/s. Considerando a aceleração da gravidade igual a $9,8 \text{ m/s}^2$, e assumindo uma resistência do ar desprezível, tem-se, pela Equação de Torricelli:

$$V^2 = V_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow (13,89)^2 = 0 + 2*(9,8)*\Delta x \Rightarrow \Delta x = 9,84\text{m} \quad (5)$$

onde: a é a aceleração, V é a velocidade, e Δx é a distância percorrida. Portanto, um objeto precisa percorrer 9,84 m em queda livre para atingir 50 km/h.

Para a realização desse tipo de ensaio, pode-se, por exemplo, instalar um banco com cinto de segurança, conforme as especificações da norma NBR 14400 (Figura 32), dentro de uma gaiola de impacto (Figura 33), e soltar essa gaiola da altura necessária.

Para parar a queda livre da gaiola, podem ser utilizados tanto uma barreira absorvedora de impacto no final do percurso, quanto um cabo limitador que a retenha antes que ela atinja o solo.

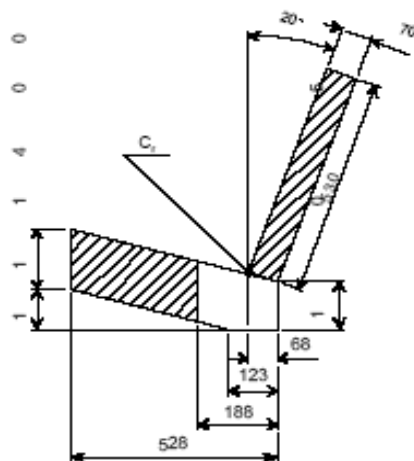


Figura 32 - Especificações do banco segundo a norma

Como exemplo, uma gaiola de "mini-baja" foi modificada para esse propósito. O teste gravitacional consistiria em suspender essa gaiola com a ajuda de um guindaste, até uma altura de no mínimo 14 metros. Desses 14 metros: 9,84 m é o percurso da queda livre, 2,15 m é o comprimento da gaiola, e o restante é colocado como margem de segurança. Depois de suspensa a gaiola seria solta, e percorreria o trecho de queda livre previsto até ser retida por um cabo limitador, que interromperia a queda livre antes que a gaiola atingisse o chão. Como o cabo limitador é o elemento que efetua a desaceleração da gaiola, o pulso de desaceleração dependeria de suas características mecânicas sob tração.



Figura 33 - Gaiola de impacto, com banco

Apêndice B

Dispositivos para a medida da compressão do abdome.

O boneco simplificado, bem como o boneco Hybrid III utilizado para comparação, não possuíam a massa moldável no abdômen, prevista nas normas brasileira e européia. Como alternativa, o texto mencionava o uso de um filme de bolhas indicado pela norma britânica BS 3254: uma norma já antiga, cuja adoção antecede à da norma ECE R44. Uma possível solução é partir para produtos disponíveis comercialmente, a serem colocados sobre o abdômen, num modo de utilização semelhante ao do filme de bolhas.

Os principais produtos disponíveis no mercado são:

- a) FSRs (*force sensitive resistors*): Consistem em dispositivos do tipo filme flexível (Figura 34-a), com um elemento sensor cujo valor da resistência elétrica diminui com o aumento da força aplicada perpendicularmente à sua superfície. Embora sua utilização seja parecida com a de uma célula de carga ou strain-gauge, seu princípio de funcionamento é bastante diferente.

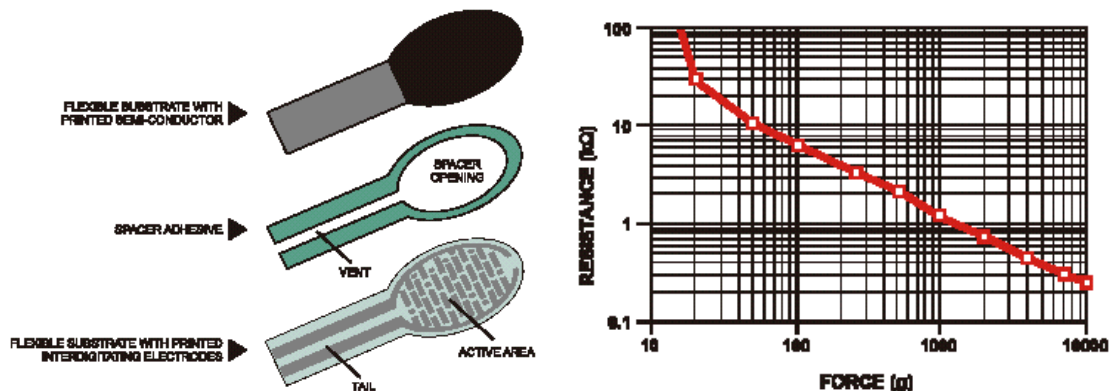


Figura 34 (a e b): Estrutura de um FSR, e sua característica resistência x força (Tekscan, 2006)

Observe que, como eles são dispositivos passivos e essencialmente resistivos, é necessário um circuito para lhes aplicar uma corrente de excitação, de forma a converter essa variação de resistência numa variação de tensão. Também é preciso corrigir sua não-linearidade (Figura 34-b), dependendo da faixa de amplitudes de força que será de interesse.

- b) *Matrizes de FSRs*: São basicamente sensores baseados no mesmo princípio dos FSRs, mas que possuem, em vez de apenas um elemento sensor, vários elementos agrupados, de forma a poder mapear a distribuição da pressão ao longo de sua superfície (Figura 35). Sua resolução depende da razão entre o número de elementos e sua área.

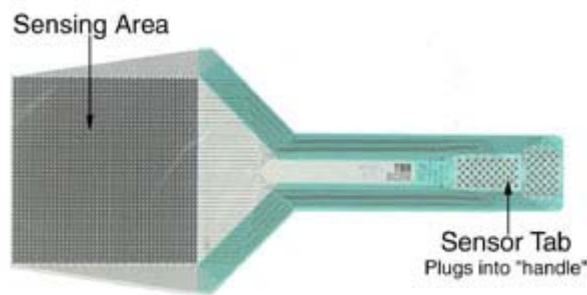


Figura 35: Matriz de FSR (Tekscan, 2006)

- c) *Pressure Sensitive Film*: Como o próprio nome sugere, é um filme que sofre alterações irreversíveis em sua coloração, quando submetido a uma força de compressão (Figura 36).

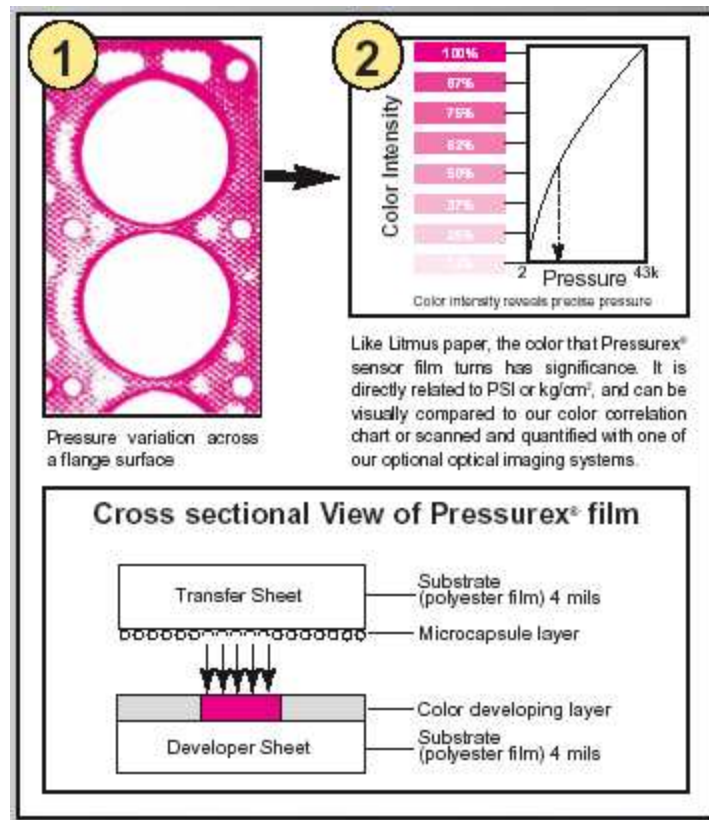


Figura 36: Coloração do filme sensível (Sensor Products, 2006)

O filme muda de coloração porque, quanto maior a pressão aplicada, maior o rompimento de micro-cápsulas, que por sua vez liberam substâncias que reagem com o pigmento. Sua resolução depende da distribuição dessas micro-cápsulas, sendo portanto da ordem de alguns microns.

Cada um desses produtos possui suas vantagens e desvantagens próprias, uma vez que são maneiras diferentes de se fazer uma mesma medida:

Os FSRs possuem a vantagem de, como sensores, permitirem a obtenção da medida no tempo, ou seja, pode-se saber como a pressão aplicada variou ao longo do tempo. Não são muito caros, podem ser reutilizados muitas vezes, e a eletrônica requerida é relativamente simples (dependendo da aplicação). Como desvantagem, eles não são dispositivos muito precisos, e antes do uso precisam ser calibrados pela aplicação de uma força conhecida. Outra desvantagem é sua

baixa resolução ao longo do plano, apenas uma variável por sensor, sendo portanto preciso combinar mais unidades para obter a distribuição de pressão ao longo de uma superfície.

As matrizes de FSRs resolvem esse problema da resolução, mas por outro lado aumentam muito o custo e a complexidade do sistema, pois cada sensor é uma matriz com dezenas ou centenas de variáveis independentes. Isso faz com que haja limitações na velocidade de captura ao longo do tempo (amostras por segundo), e também requer a conexão a um computador ou similar por um cabo relativamente curto, o que torna difícil sua utilização num teste de impacto como o deste trabalho (pois seria necessário um computador resistente a impactos). Outra desvantagem é estar sujeito aos formatos de matrizes oferecidos pelo fabricante (embora seja possível fazer um projeto sob encomenda, isso é viável apenas para quantidades muito grandes). Ou seja, para um sistema que tenha a intenção de ser de baixo custo, esses sensores não são indicados.

Por último, os filmes sensíveis são um sistema bastante simples, possuem a vantagem de não requerer nenhuma eletrônica embarcada, e permitem mapear a distribuição de pressão ao longo da superfície com alta resolução. Contudo, esse filme é descartável, se caracterizando como um consumível de alto custo. Outra desvantagem é não apresentar a distribuição da pressão ao longo do tempo, registrando apenas os valores de pico ao qual o filme foi submetido. Para saber os valores de pressão com uma boa precisão, é necessário adquirir um scanner proprietário do fabricante. Se for utilizada apenas a inspeção visual, comparando com uma tabela de coloração, a margem de erro é alta.

Anexo 1

Principais características do modelo de acelerômetro utilizado

Reprodução da primeira página do *datasheet* do C.I. MMA 3202D, do fabricante *Freescale Semiconductor*.

Surface Mount Micromachined Accelerometer

The MMA3202 series of dual axis (X and Y) silicon capacitive, micromachined accelerometers features signal conditioning, a 4-pole low pass filter and temperature compensation and separate outputs for the two axes. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. A full system self-test capability verifies system functionality.

Features

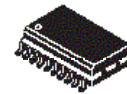
- Sensitivity in two separate axes: 100g X-axis and 50g Y-axis
- Integral Signal Conditioning
- Linear Output
- Ratiometric Performance
- 4th Order Bessel Filter Preserves Pulse Shape Integrity
- Calibrated Self-test
- Low Voltage Detect, Clock Monitor, and EPROM Parity Check Status
- Transducer Hermetically Sealed at Wafer Level for Superior Reliability
- Robust Design, High Shocks Survivability

Typical Applications

- Vibration Monitoring and Recording
- Impact Monitoring
- Appliance Control
- Mechanical Bearing Monitoring
- Computer Hard Drive Protection
- Computer Mouse and Joysticks
- Virtual Reality Input Devices
- Sports Diagnostic Devices and Systems

MMA3202D

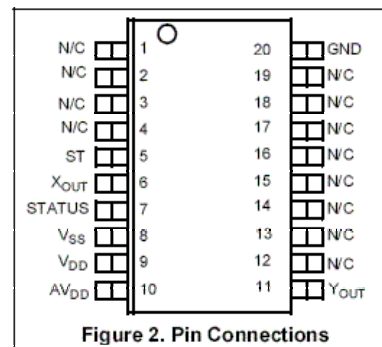
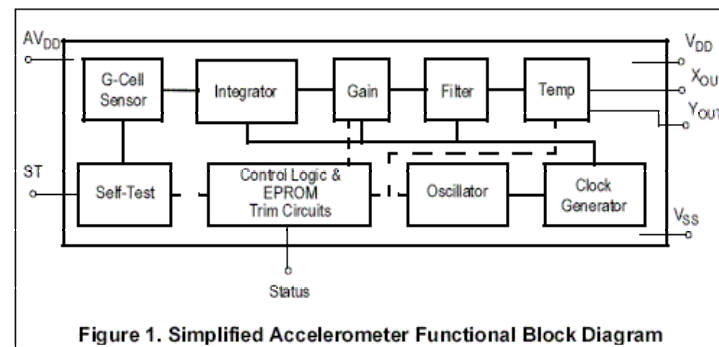
**MMA3202D: X-Y AXIS SENSITIVITY
MICROMACHINED
ACCELEROMETER
±100/50g**



**D SUFFIX
20-LEAD SOIC
CASE 475A-01**

ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Case No.	Package
MMA3202D	- 40 to +125°C	475A-01	SOIC-20
MMA3202DR2	- 40 to +125°C	475A-01	SOIC-20, Tape & Reel



Anexo 2

Categorias de faixa de frequência, para as medições elétricas

A norma especifica uma CFC de 180 para a medida das desacelerações no tórax, e de 1000 para a medida das desacelerações na cabeça. Esses valores correspondem às frequências F_L , F_H e F_N , indicadas na Figura 37:

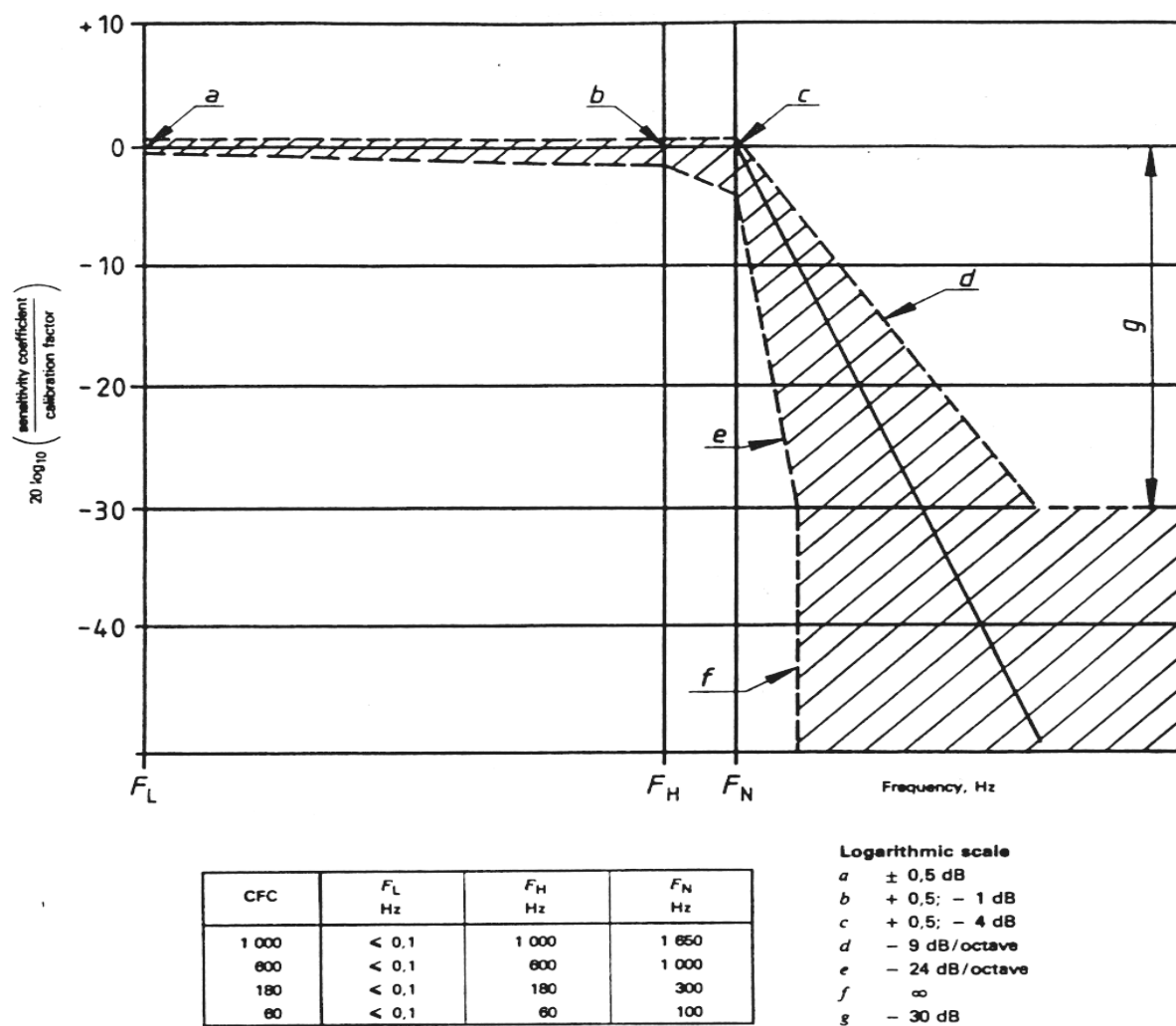


Figura 37: Categorias de faixa de frequência, segundo a norma ISO 6487