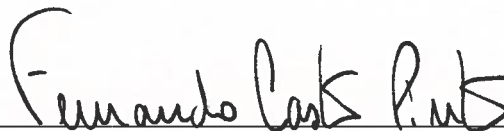


“Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da equipe de Formula SAE da  
UFRJ”

Luiz Otavio da Costa Marcelo Pereira

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO MECÂNICO.

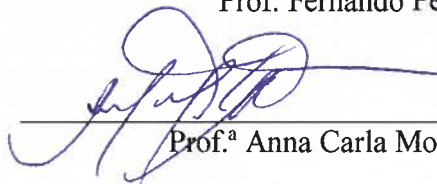
Aprovado por:



Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto



Prof. Fernando Pereira Duda



Prof.ª Anna Carla Monteiro de Araujo

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2013

## **Agradecimentos**

Agradeço ao técnico Robson Araújo, do Laboratório de Propriedades Mecânicas, pela orientação para os ensaios quasi-estáticos, assim como o técnico Marcus, pelo auxílio na realização dos ensaios no Laboratório de Preparação de Amostras, ambos do departamento de Engenharia Metalúrgica da UFRJ.

Agradeço aos colegas de graduação, Gustavo Carvalho Martins, por ajudar na fabricação e na condução dos ensaios dinâmicos, Rodrigo Goi, por compartilhar sua experiência na utilização da câmera de alta velocidade, e também o mestrando Guilherme Pedroto, por me guiar na aquisição de dados utilizando os acelerômetros.

Agradeço à todos os colegas da Equipe de Formula SAE da UFRJ, pois sem o apoio financeiro deles e a infraestrutura deles não seria possível a realização deste projeto.

Agradeço todo o corpo docente do departamento de Engenharia Mecânica da UFRJ, em especial a professora Anna Carla Araujo, pela permissão da realização dos experimentos no laboratório de Tecnologia Mecânica.

Agradeço especialmente ao professor Fernando Castro Pinto, orientador deste trabalho, por me guiar ao longo do trabalho, e acreditar sempre no meu potencial para a realização das tarefas.

Por último, agradeço a minha família, pelo apoio incondicional durante todo o curso da graduação.

# Sumário

1	Introdução .....	3
1.1	Competição Formula SAE e a Equipe UFRJ .....	3
1.2	Atenuador de Impacto .....	4
1.3	Objetivos .....	4
2	Absorvedores de Impacto .....	6
2.1	Possíveis construções .....	7
2.2	Material Adotado no Projeto .....	12
3	Modelagem do Impacto .....	13
3.1	Força Média e Força Máxima .....	13
3.2	Modelo com aceleração constante .....	14
3.3	Propagação de onda em materiais RPPL .....	16
4	Espuma de PVC .....	21
4.1	Estrutura celular .....	21
4.2	Densidade do Material .....	22
4.3	Comportamento sob compressão .....	23
4.4	Influência da taxa de deformação .....	26
4.5	Outras propriedades do material .....	30
5	Projeto do Atenuador de Impacto .....	33
5.1	Escolha do material .....	34
5.2	Chassi do Veículo .....	34
5.3	Geometria do atenuador de impacto .....	35
5.4	Integração do atenuador de impacto ao veículo .....	37
5.5	Resumo do Projeto .....	38
6	Experimento Quase-Estático .....	39
6.1	Tratamento de dados .....	41
6.2	Resultados .....	44

6.3	Conclusões dos resultados .....	48
7	Simulação Computacional.....	51
7.1	Objetivos.....	51
7.2	Tipo de Solução .....	52
7.3	Modelo do Material .....	53
7.4	Geometria.....	57
7.5	Escolha da Malha.....	57
7.6	Condições Iniciais e de Contorno .....	58
7.7	Carregamentos .....	59
7.8	Resultados.....	60
8	Experimento de Queda Livre.....	63
8.1	Aparato Experimental .....	64
8.2	Planejamento dos ensaios .....	67
8.3	Resultados.....	68
8.4	Conclusões.....	74
9	Conclusões.....	75
10	Bibliografia.....	78
11	Anexos.....	83
A.	Resumo do regulamento do Formula SAE para o atenuador de impacto.....	83
B.	Desenhos de Projeto do Atenuador de Impacto.....	85
C.	Montagem do experimento de queda livre.....	92
D.	Procedimento para a utilização do software de tratamento de imagens .....	96
E.	Imagens dos ensaios de queda livre .....	98
F.	Vídeos filmados com a câmera de alta velocidade.....	102

# 1 Introdução

## 1.1 Competição Formula SAE e a Equipe UFRJ

A Equipe de Formula SAE é um projeto extracurricular da Universidade Federal do Rio de Janeiro composto por alunos da graduação com o objetivo estimular os alunos a ser realizar boas práticas de engenharia através de um problema real, um projeto de um veículo de alto desempenho, dentro do ambiente universitário.



**Figura 1.1: Protótipo da UFRJ do ano de 2012.**

A competição Formula SAE é um evento anual realizado em diversos países. Realizada pelas sedes nacionais da SAE (Society of Automotive Engineers), trata-se de uma competição de engenharia onde os alunos das universidades devem projetar seu protótipo de acordo com diversas regras de validade internacional. Estas regras são limitadores de desempenho e muitas vezes simulam medidas de segurança semelhantes a normas técnicas para projetos de engenharia.

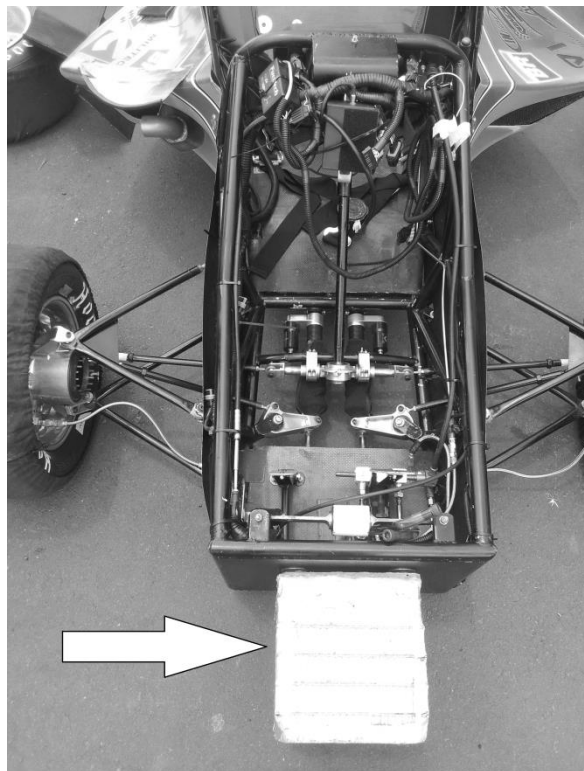
No país, o evento é organizado anualmente pela SAE Brasil. A equipe da UFRJ participa da competição desde sua primeira edição, realizada no ano de 2003. Durante 3 dias, as equipes são avaliadas em várias provas, que podem ser separadas em estáticas, dinâmicas e testes de segurança.

As provas estáticas e dinâmicas correspondem respectivamente a 35% e 65% da pontuação total que uma equipe pode fazer. Os testes de segurança são apenas etapas de verificação de conformidade do veículo em relação às regras. O carro deve passar em todos os testes de segurança antes de poder participar de qualquer prova dinâmica. Em casos especiais, os juízes podem exigir que algum teste de segurança seja refeito.

## 1.2 Atenuador de Impacto

Como foi dito anteriormente, a regra da competição prevê uma série de exigências para assegurar a segurança dos pilotos e de todos os presentes no evento. Para o chassis do carro, há diversas exigências para o caso de colisão frontal, colisão lateral, capotamento, além das condições normais de funcionamento do veículo.

Para o caso de colisão frontal, a regra prevê um dispositivo para absorção de impacto. O projeto do dispositivo é verificado por uma comissão de juízes através de um relatório que deve ser enviado alguns meses antes da realização da competição. Este relatório deve conter fotos, dados e descrição de um procedimento experimental que valide o projeto de acordo com as exigências da regra.



**Figura 1.2: Exemplo de atenuador de impacto para veículos Formula SAE.**

## 1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é de propor um projeto de atenuador de impacto que possa ser utilizado pela equipe de Formula SAE da UFRJ. Para isso, é necessário que o projeto seja de fácil execução, que seja compatível com o atual projeto do protótipo, e que também atenda todos os requisitos impostos pela regra da competição.

Para que todos os objetivos sejam atingidos, vamos apresentar brevemente as características do projeto do chassi do protótipo, vamos identificar e detalhar um método de projeto para que o atenuador de impacto atinja as especificações requeridas, e finalmente apresentar desenhos para que o projeto seja realizado e fabricado pelos integrantes da equipe, e possivelmente apresentado na competição de 2013.

O leitor irá notar ao longo do texto que o material escolhido para o atenuador de impacto (espuma de PVC) fez com que fosse necessário um grande esforço para aprofundar o conhecimento do comportamento mecânico do material. Conforme pede a regra, foram realizados alguns experimentos para a verificação do modelo numérico utilizado. Portanto, o objetivo secundário deste projeto foi a caracterização do material escolhido, e alguns resultados podem ser usados como referência para trabalhos futuros.

## 2 Absorvedores de Impacto

A realidade em que vivemos exige uma variedade de exigências para situações em que é necessário amortecer impacto. Um exemplo clássico é o colete à prova de balas. O objetivo do dispositivo é proteger o usuário contra projéteis de armas de fogo. Para isso, o colete precisa absorver a energia cinética do projétil, assim como evitar a penetração deste no corpo do usuário.

Outro exemplo de absorvedor de impacto são os capacetes. O objetivo deles é de proteger a cabeça do usuário no caso de quedas ou colisões. Além de absorver a energia no impacto, é também importante que o capacete não sofra ruptura ou penetração, para dar mais segurança e evitar lesões mais graves à cabeça do usuário.

Ambos os exemplos anteriores são de casos em que não queremos penetração. Entretanto, existem casos em que a deformação do absorvedor é bem vinda, pois promove a diminuição da desaceleração durante o processo. Este é o caso dos atenuadores de beira de estrada. Estes têm como objetivo amortecer o impacto no caso em que um veículo venha a perder a direção, ou então para evitar a colisão em obstáculos como barreiras de concreto, muito comum em pontes, viadutos ou rodovias de alta velocidade.

Por último, também temos estruturas absorvedoras de impacto para proteção de outros produtos mais frágeis e de alto valor agregado. São exemplos de aparelhos eletrônicos, que usualmente vêm embalados em uma estrutura de isopor para prevenir dano em caso de quedas de alturas médias, como um metro ou um metro e meio.

Em alguns veículos de passeio, temos um dispositivo denominado *crashbox*. Este dispositivo é uma peça ou conjunto de peças tubulares projetada para sofrer flambagem e deformar plasticamente em caso de colisão em baixa velocidade. O objetivo deste dispositivo é de proteger o chassi do carro e evitar danos a elementos como a ventoinha do radiador, diminuindo assim o custo de reparo do carro.

A discussão dos dispositivos de absorção de impacto é importante para identificar características de cada tipo de dispositivo, e identificar as necessidades do projeto em questão para tomar decisão de qual é o melhor sistema para a nossa aplicação.



Alguns dispositivos estão relacionados a impactos locais e prevenção de perfuração. São os casos dos capacetes e coletes a prova de balas. Para o protótipo do fórmula SAE, nós não precisamos nos preocupar com perfurações locais no projeto do atenuador de impacto. A placa anti-intrusão é responsável por evitar penetração de objetos dentro do *cockpit*, e para fins de projeto, a barreira onde o veículo irá colidir será idealmente rígida e plana.

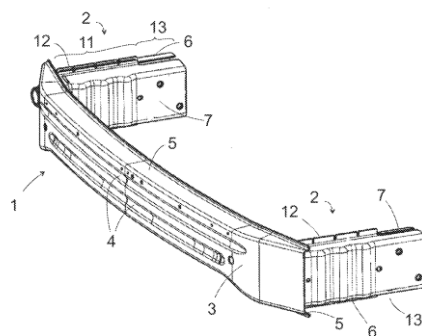
## 2.1 Possíveis construções

Após essa discussão inicial, se torna importante agora discutir os possíveis materiais para a utilização na construção do atenuador de impacto. A seguir, mostramos algumas das soluções que foram consideradas durante o projeto.

### 2.1.1 *Crashbox* metálico

*Crashbox* é um conceito de sistema de absorção de impacto que é baseado na deformação plástica de materiais metálicos para a absorção de energia. Em caso de colisão, a estrutura sofre flambagem e então consegue absorver impacto a uma desaceleração aproximada constante. Usualmente a geometria possui rugas para que o começo da flambagem seja controlado.

A figura 2.1 é um desenho esquemático de uma patente que utiliza o conceito *crash-box*. Repare que são dois *crashbox*, um de cada lado. Assim, é possível absorver impacto com eixo fora de centro, assim como cobrir toda a extensão da frente do carro. Além disso, é possível observar que a superfície do *crashbox* é enrugada, para que o comportamento do dispositivo durante a flambagem seja mais previsível.



**Figura 2.1: Representação de um para-choque com o conceito *crashbox*. Adaptado de (Patschike, 2013)**

A dificuldade do conceito é prever com acurácia o comportamento da estrutura em regime de pós-flambagem. Existem pacotes numéricos para simular este fenômeno, mas de qualquer forma é necessário cautela no projeto, já que o fenômeno de flambagem é um problema instável, logo de difícil de ser previsto com precisão.

Na literatura existem modelos paramétricos para o dimensionamento de *crashbox* baseados em uma série de experimentos. Saied e Shuaieb apresentam um estudo para tubos quadrados em material metálico e compósito (Saied, et al., 2007). Já Nakazawa apresenta estudos com diferentes geometrias para materiais metálicos (Nakazawa, et al., 2005).

As vantagens do *crashbox* são o fato de ele ser de fácil fabricação, além do material, no caso aço ou alumínio, ser a um preço acessível. Entretanto, tem como desvantagens o problema de dimensionamento assim como a característica de ter geometrias longas. Por estes motivos, o uso deste tipo de construção foi desconsiderado.

### 2.1.2 *Honeycomb* de alumínio

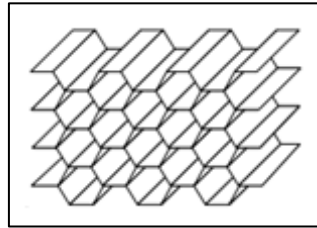
Estruturas *honeycomb*, ou colmeia, são materiais modernos utilizados na indústria aeronáutica e outras que precisam de materiais com alto nível de exigência. Essas estruturas são recomendadas para construções sanduiche, são utilizadas como alma em conjunto com materiais outros materiais compósitos, assim como em aplicações de absorção de impacto.



**Figura 2.2: Exemplos de estruturas em *honeycomb* de alumínio. Adaptado de (Plascore, 2012)**

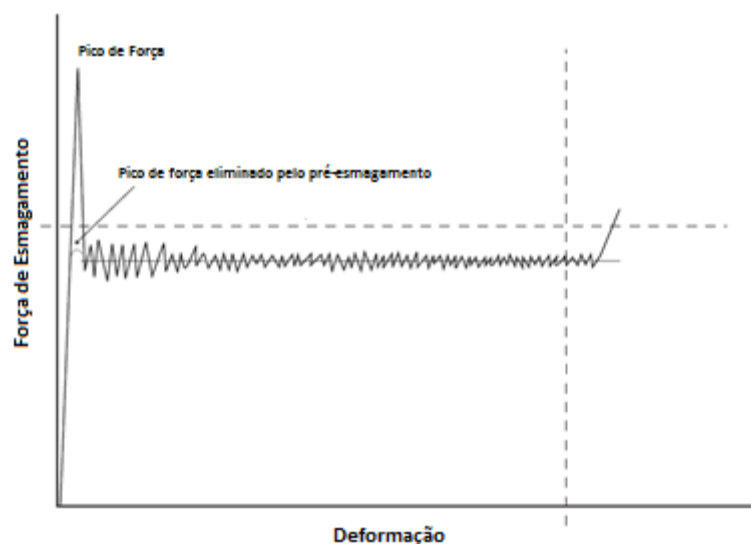
A estrutura em *honeycomb* é obtida através da combinação de diversas placas de alumínio com ranhuras obtidas através de um processo de conformação. Estas placas

são coladas uma sobre as outras, e o resultado é uma configuração que se assemelha a uma colmeia de abelha. No mercado é possível encontrar diversas configurações para a colmeia, mas a mais comum é representada na figura 2.3.



**Figura 2.3: Representação de uma estrutura típica de *honeycomb*. Adaptado de (Hexcell, 1999)**

Uma das características mais interessantes do *honeycomb* de alumínio é o formato da curva de tensão deformação. A figura 2.4 ilustra uma curva típica do material.



**Figura 2.4: Gráfico Força-Deslocamento típico para estruturas do tipo *honeycomb* de alumínio. Adaptado de (Hexcell, 2005)**

O mecanismo de deformação durante a compressão dessas estruturas é caracterizado por três fases: Deformação linear elástica; esmagamento das camadas, este trecho é caracterizado pela flambagem da estrutura por camadas e tensão de esmagamento constante durante o processo; e por ultimo a compressão total do material, após a flambagem de todas as camadas, a tensão de compressão volta a crescer com a deformação do material.

O comportamento da curva tensão deformação, em especial o fato da tensão de esmagamento ser aproximadamente constante por um longo trecho de deformação, torna o *honeycomb* de alumínio em uma opção interessante para aplicações em que é necessário absorver impacto.

Note que há uma carga de pico na transição entre o trecho de deformação linear e o trecho de esmagamento. Os projetos de absorção de impacto preveem uma pré-deformação da estrutura, antes da distribuição para o usuário final. Assim, no evento da colisão, não haverá um pico de carga.

Uma análise preliminar demonstra que o material é uma opção interessante, já que é possível atingir as metas de aceleração média utilizando as especificações do catálogo dos fabricantes.

Por outro lado, a dificuldade de adquirir o material inviabilizou o projeto. As empresas fabricantes não possuem distribuidoras oficiais no Brasil. Foi localizada uma empresa revendedora no Rio de Janeiro, mas que não trabalha com estoques do material, aceitando apenas encomendas de grande volume.

A forma de comercialização do material, vendidos em placas de 1 m<sup>2</sup> e de espessura variável, inviabilizam pedidos de importação. Além disso, o próprio preço inicial do material é elevado, e portanto, o material foi desconsiderado para o projeto.

### 2.1.3 Espuma Metálica

Espuma metálica é uma classe de material relativamente nova e com grandes potenciais devido à baixa densidade e alta resistência mecânica. Os primeiros textos na literatura sobre o assunto datam de 1997 e 1998 e, apesar de não haver grandes informações na literatura, o material promete permitir produtos mais leves e de melhor desempenho

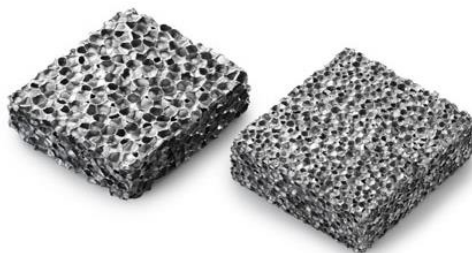
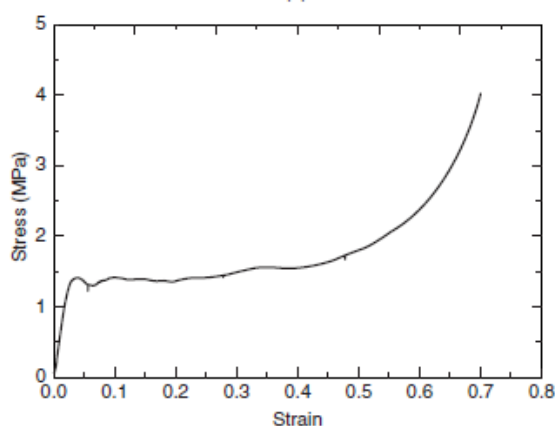


Figura 2.5: Exemplos de espuma metálica. Adaptado de (Metacorp Nanostructures, 2006)

Semelhante ao *honeycomb* de alumínio, a curva de tensão-deformação desse tipo de material apresenta um longo trecho em que a tensão permanece constante. Logo, esse tipo de espuma seria válido para uma aplicação de absorção de energia.

Além da capacidade de absorver energia, as espumas metálicas também são bons materiais para estruturas sanduiche, pois tem boa resistência e baixo peso específico. Além disso, o custo de fabricação, indicado em (Ashby, et al., 200), é inferior ao de um painel *honeycomb*, sendo assim mais atrativo economicamente.

Infelizmente, assim como o *honeycomb* de alumínio, a espuma metálica é de difícil acesso dentro do Brasil. Não há nenhum fabricante nacional, e o custo de importação seria proibitivo.



**Figura 2.6: Curva tensão deformação para uma espuma de alumínio. Adaptado de (Ashby, et al., 200)**

#### 2.1.4 Espuma Polimérica

Material comum em embalagens de eletrônicos, as espumas poliméricas são utilizadas em algumas aplicações em que se deseja absorver impacto.

Ao contrário das espumas metálicas, as espumas poliméricas tem extensa utilização na indústria. São exemplos, colchões, assentos de veículos, proteções em capacetes, boias para piscina, etc. São diversos os tipos de aplicações, seja para fins estruturais, ergonômicos, isolamento térmico ou acústico, assim como para fins decorativos.

Para a absorção de impacto, é possível encontrar algumas classes de espuma em que temos a principal característica favorável para a absorção de impacto: curvas de tensão deformação com longos trechos de deformação constante.

Existem fabricantes especializados para este fim, como é o caso da *Impaxx*, espuma de poliestireno comercializada pela *Coastal Automotive* (Coastal Automotive, 2011). O produto é reconhecido no ramo automobilístico para a fabricação de itens de segurança contra o impacto. É notável a capacidade da empresa de fornecer a espuma extrudada já na geometria final da peça desejada, demonstrando a flexibilidade e possível customização desse material.

Além disso, existem classes de espuma que são utilizadas em estruturas sanduíche pela indústria. É o exemplo do *Divinycell H*, fabricada pela *Diab*. A empresa é especializada em produtos para alma de estruturas sanduíche, e o produto *Divinycell* é uma espuma de PVC, fornecida em placas de 1 m<sup>2</sup> em espessuras e densidades variadas. Estas placas são utilizadas no Rio de Janeiro pelos estaleiros para embarcações de pequeno e médio porte, como lanchas e embarcações amadoras. Existe uma empresa revendedora localizada na cidade, logo o acesso à mercadoria é relativamente fácil.

## **2.2 Material Adotado no Projeto**

Após extensa pesquisa de materiais, a análise de todas as possibilidades para o projeto de um atenuador de impacto, foi decidido que a solução mais interessante para o projeto do atenuador de impacto é a espuma de PVC.

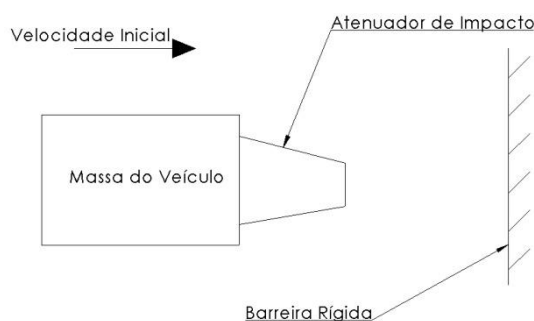
Como foi dito anteriormente, existe pelo menos uma empresa revendedora do produto em solo nacional. O fabricante garante características mecânicas do produto, tornando-o como adequado para uso estrutural.

Na literatura, existem diversos artigos que abordam as diversas propriedades do material que podem ser necessárias para o projeto do absorvedor de impacto. Todas essas propriedades serão detalhadas no capítulo seguinte desse texto.

### 3 Modelagem do Impacto

O problema do impacto consiste em estudar a colisão entre dois ou mais corpos. No caso do atenuador do impacto, queremos que o dispositivo seja um amortecedor do impacto, caso o veículo atinja frontalmente uma barreira qualquer.

Nesta seção, vamos identificar algumas relações básicas, mas que podem dar uma sensibilidade ao leitor das ordens de grandeza do problema. Para fins de projeto, vamos simplificar o nosso modelo considerando que a barreira é rígida, assim o como o veículo. O atenuador será suposto como engastado ao veículo, de forma que o ultimo pode ser considerado como uma massa pontual.



**Figura 3.1: Desenho esquemático do modelo de impacto.**

O atenuador de impacto tem dois objetivos de projeto essenciais: ser capaz de absorver a energia cinética do veículo, e impor uma desaceleração média inferior a 20 g. A segunda condição impõe uma série de limitações muito importantes no projeto do atenuador. Vamos identificar tais limitações, para que elas sirvam de guia para obtermos as dimensões finais do dispositivo.

#### 3.1 Força Média e Força Máxima

Se simplificarmos o veículo por uma massa pontual, então, pela segunda lei de Newton, temos

$$\tilde{F} = M\tilde{a} \quad (3-1)$$

Se quisermos satisfazer as condições de projeto do atenuador de impacto, os limites para as forças média e máxima que ele deve transmitir para o veículo são:

$$F_{m\u00e9dia} = Ma_{m\u00e9dia} = 300 * 20 * 9.81 = 58,9kN \quad (3-2)$$

$$F_{m\u00e1xima} = Ma_{m\u00e1xima} = 300 * 40 * 9.81 = 117,2kN \quad (3-3)$$

Portanto, para que o atenuador seja v\u00e1lido, \u00e9 necess\u00e1rio que as for\u00e7as m\u00e9dia e m\u00e1xima sejam inferiores aos valores apresentados acima.

### 3.2 Modelo com acelera\u00e7\u00e3o constante

A desacelera\u00e7\u00e3o m\u00e9dia \u00e9 muito importante no projeto do atenuador de impacto, sendo um dos principais motivadores na escolha do material. Portanto, \u00e9 razo\u00e1vel analisarmos um caso hipot\u00e9tico em que temos a acelera\u00e7\u00e3o constante tal que:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} = -a_m \quad (3-4)$$

Considerando que a velocidade inicial do ve\u00edculo \u00e9  $v_o$  e que a posi\u00e7\u00e3o inicial \u00e9 nula, podemos derivar da rela\u00e7\u00e3o 3-4(3-4 as express\u00f5es da velocidade e do deslocamento para o caso de movimento retil\u00edneo uniforme. \u00c9 poss\u00edvel demonstrar que o deslocamento m\u00e1ximo do ve\u00edculo durante o impacto ocorre no instante que a velocidade do ve\u00edculo \u00e9 nula. Portanto, temos que:

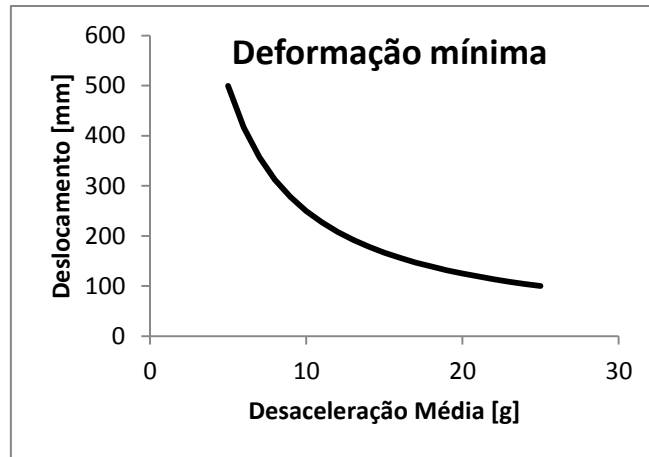
$$v(t_f) = 0 \rightarrow t_f = \frac{v_o}{a_m} \quad (3-5)$$

$$y_{m\u00e1x} = y(t_f) = \frac{v_o^2}{2a_m} \quad (3-6)$$

Conhecer o comprimento de deforma\u00e7\u00e3o \u00e9 importante para escolher a altura de projeto do atenuador de impacto. O gr\u00e1fico da figura 3.2 ilustra bem o fato de que, quanto menor a desacelera\u00e7\u00e3o de projeto durante o impacto, mais o atenuador deve se deformar. Repare que para uma desacelera\u00e7\u00e3o de 20 g, o atenuador deve se deformar pelo menos 125 mm, e que para desacelera\u00e7\u00f5es inferiores a 10 g o projeto come\u00e7a a se tornar invi\u00e1vel, necessitando 245 mm de deforma\u00e7\u00e3o.

J\u00e1 o conhecimento da dura\u00e7\u00e3o do impacto \u00e9 \u00fasil tanto para calcular a desacelera\u00e7\u00e3o m\u00e9dia quanto para saber para par\u00e2metros para a simula\u00e7\u00e3o em elementos finitos. \u00c9 poss\u00edvel mostrar que o problema em quest\u00e3o trata-se de um impacto com dura\u00e7\u00e3o entre 25 ms e 70 ms, se considerarmos valores de desacelera\u00e7\u00e3o entre 10 e 20 g.





**Figura 3.2: Deslocamento mínimo durante o impacto em função da desaceleração média. Gráfico para o caso em que a velocidade inicial é de 7 m/s.**

### 3.2.1 Desaceleração média

A desaceleração média durante o impacto é um item importante, já que todo o projeto do atenuador de impacto é baseado neste aspecto. Depois de calculados a duração do impacto, é possível calcular média da desaceleração através da definição de média de uma função:

$$a_{média} = \frac{1}{t_f - t_o} \int_{t_o}^{t_f} a(t) dt \quad (3-7)$$

Sabendo que a integral da aceleração é velocidade, e considerando  $t_o = 0$ ,  $v(t_o) = v_o$  e  $v(t_f) = 0$ , temos que:

$$a_{média} = \frac{v_o}{t_f} \quad (3-8)$$

### 3.2.2 Taxa de deformação

Dependendo do material a ser utilizado, a taxa de deformação pode influenciar no comportamento constitutivo. Para efeitos de cálculo, para obter estimativas de ordem de grandeza, podemos supor que o material se deforma uniformemente ao longo de toda a sua altura. Assim, podemos propor a seguinte relação para a taxa de deformação:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} \quad (3-9)$$

O gráfico da figura 3.3 ilustra a variação da taxa de deformação inicial de acordo com a altura inicial do atenuador de impacto, antes de iniciar a deformação. Idealmente,

esta seria a mais alta taxa de deformação. Assim, podemos utilizar modelos teóricos para estimar efeito viscoelástico do material.

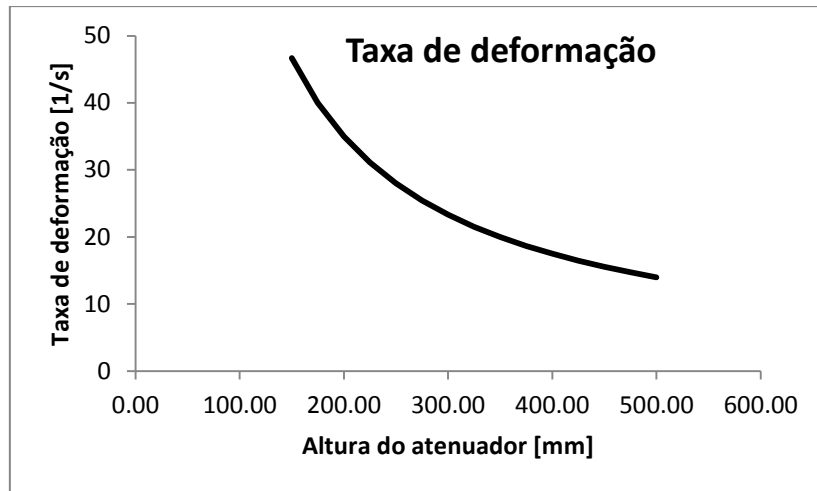


Figura 3.3 : Ilustração da variação da taxa de deformação inicial para o impacto de velocidade inicial de 7 m/s, em função da altura do atenuador.

### 3.3 Propagação de onda em materiais RPPL

Proposto pela primeira vez por (Reid, et al., 19987), o modelo RPPL (em inglês: Rigid, Perfectly Plastic, Locking – RPPL) é uma simplificação para o comportamento de materiais de espuma sólida, proposto por (Tan, et al., 2010). Inspirado nas três etapas típicas da curva de tensão deformação desses materiais: o estágio elástico, o estágio de platô, e o estágio de densificação, o comportamento do material é modelado simplifcadamente como infinitamente rígido, no estágio elástico; perfeitamente plástico no estágio de platô e novamente infinitamente rígido, no estágio de densificação.

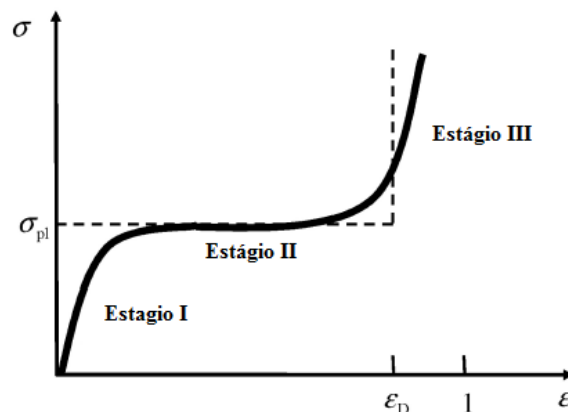
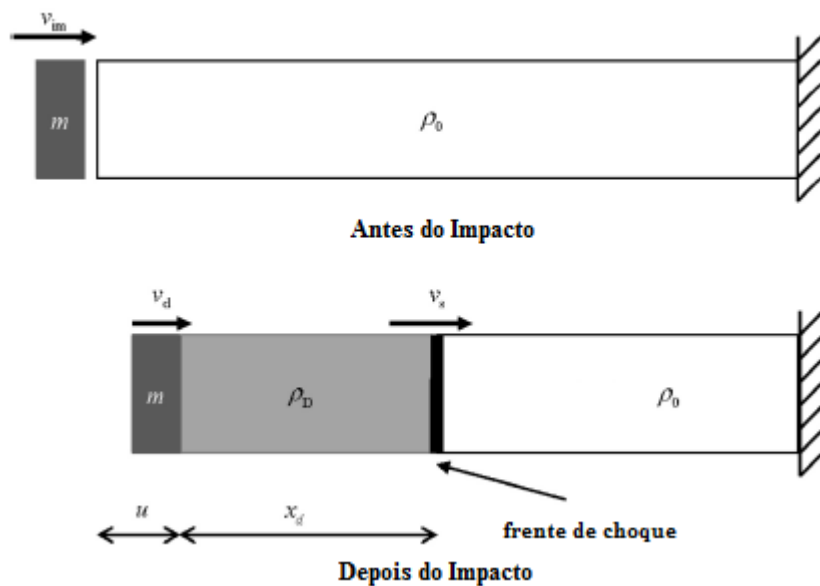


Figura 3.4: Representação do comportamento do material no modelo RPPL. A curva sólida representa a curva de tensão real para um material de espuma hipotético, e em tracejado, a curva aproximada pelo modelo. Adaptado de (Tan, et al., 2010)

Este modelo é usualmente apresentado no estudo de espumas metálicas, mas pode ser válido para qualquer material que apresenta curva de tensão-deformação semelhante, como é o caso do *honeycomb* de alumínio e também da espuma de PVC.

A partir do modelo RPPL, podemos derivar um modelo para o comportamento da espuma em caso de impacto. Vamos considerar um caso de impacto de uma massa  $M$  em uma extremidade de uma barra de material RPPL. A outra extremidade da barra é fixa. A velocidade inicial da barra é nula, e a massa tem velocidade  $v_o$ . Após a colisão, uma onda de choque plástica se move em direção à extremidade fixa, separando a barra em duas regiões. A primeira região, a barra tem deformação equivalente à deformação de densificação,  $\varepsilon_d$ , e velocidade igual a da massa de impacto,  $v_d$ . Na região que ainda não foi atingida pela frente de onda, o material tem deformação e velocidade nulas. A velocidade da onda de choque é  $v_s$ .



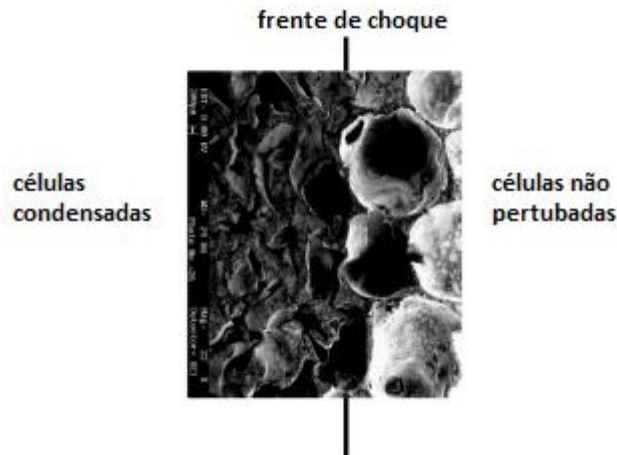
**Figura 3.5: Desenho esquemático para o modelo de impacto em materiais RPPL. Adaptado de (Tan, et al., 2010).**

Algumas suposições são feitas para chegarmos a um modelo analítico. São elas:

1. Há uma frente de onda extremamente fina separando as duas regiões, de tal forma que a transição é abrupta, e a densidade do material é virtualmente descontínua ao longo do comprimento da barra.
2. As partículas na região densificada tem a mesma velocidade que a massa de impacto.

3. A camada densificada tem densidade constante.
4. Os efeitos da taxa de deformação e modos de falha locais são ignorados (mas não necessariamente desprezíveis).

As suposições 1, 2 e 3 são baseadas em experimentos com materiais de espuma metálica, como mostrada na Figura 3.6, e em espuma polimérica, em artigo apresentado por (Masso-Moreau, et al., 2003).



**Figura 3.6: Detalhe da estrutura micrográfica da espuma de alumínio após sofrer impacto. É possível reparar o limite da frente de onda entre as partes densificada e a outra, intacta. Adaptado de (Radford, et al., 2005)**

Vamos agora deduzir a resposta da barra RPPL ao impacto. Pela definição de deformação, e pelas hipóteses feitas acima, temos que a deformação de densificação do material é dada por:

$$\varepsilon_d = \frac{u(t)}{x_d(t) + u(t)} \quad (3-10)$$

Repare que  $u(t)$  é o deslocamento da massa de impacto, e  $x_d(t)$  é o comprimento da região da barra que sofreu densificação. Para que haja conservação de massa, é necessário que a seguinte relação seja verdadeira:

$$\frac{\rho_o}{\rho_d} = 1 - \varepsilon_d \quad (3-11)$$

Pela hipótese 2, temos também que:

$$v_d = \frac{du}{dt} \quad (3-12)$$

Vimos que a velocidade de propagação do choque,  $v_s$ , é maior que a velocidade da massa de impacto. De fato, temos que:

$$\frac{dx_d}{dt} = v_s - v_d \quad (3-13)$$

Combinando as equações 3-10, 3-12 e 3-13, temos:

$$\frac{dx_d}{dt} = \frac{1 - \varepsilon_d}{\varepsilon_d} v_d \quad (3-14)$$

Agora, se fizermos um balanço de conservação de massa, temos que a variação da velocidade da massa de impacto, mais a variação massa e da velocidade da região densificada, é igual à força exercida pela interface da região em repouso com a frente de choque:

$$\frac{d}{dt} [M v_d + \rho_d A x_d v_d] = -\sigma_{pl} A \quad (3-15)$$

Abrindo a expressão da equação (3-15 3-15, e utilizando as relações 3-11, 3-12, 3-13 e 3-14, podemos chegar à relação:

$$v_d \frac{dv_d}{du} = - \frac{\left( \sigma_{pl} + \frac{\rho_o}{\varepsilon_d} v_d^2 \right)}{\left( \frac{M}{A} + \rho_d u \right)} \quad (3-16)$$

Finalmente, integrando a equação 3-16 com as condições iniciais  $v = v_o$  e  $u = 0$ , temos:

$$v_d = v_c \sqrt{\left[ 1 + \left( \frac{v_o}{v_c} \right)^2 \right] \left( \frac{1}{1 + \frac{u}{l_e}} \right) - 1} \quad (3-17)$$

Onde a velocidade característica,  $v_c$ , e o comprimento característico,  $l_e$ , são dados por:

$$v_o = \sqrt{\frac{\varepsilon_d \sigma_{pl}}{\rho_o}} \quad (3-18)$$

$$l_e = \frac{A \rho_d}{M} \quad (3-19)$$

Para encontrarmos a evolução do deslocamento da massa de impacto, basta substituírmos a equação 3-17 na 3-12, e realizarmos a integração no tempo assumindo que  $u(0) = 0$ .

$$u(t) = l_e \left[ \sqrt{1 + 2t \frac{v_o}{l_e} - \left(t \frac{v_c}{l_e}\right)^2} - 1 \right] \quad (3-20)$$

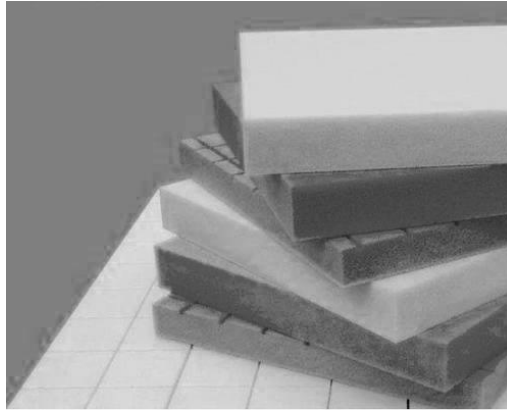
A partir das equações (3-17 3-17 e 3-2 podemos obter expressões para o deslocamento máximo da massa, o tempo total de impacto, e consequentemente a desaceleração média.

Repare que o modelo apresenta uma série de simplificações. A primeira é a limitação da barra com seção transversal constante, impedindo o uso para geometrias mais complexas. O segundo, e mais importante, é que o modelo não é capaz de prever o comportamento visco-elástico do material.

O modelo foi apresentado neste trabalho com a finalidade de apresentar aquilo que está presente na literatura. Infelizmente, não é válido para o problema em questão pois não leva em consideração o efeito da taxa de deformação durante o impacto. Foram feitas tentativas de modificação do mesmo para adapta-lo ao problema com seção transversal variável e de material dependente da taxa de deformação, mas o problema se torna complexo, e não é mais possível obter uma solução analítica.

## 4 Espuma de PVC

Como foi dito no final do capítulo anterior, o material de base escolhido para o projeto do atenuador de impacto foi a espuma de PVC. Há um fornecedor que comercializa a espuma em placas, o que torna um material viável para a construção de um número pequeno de protótipos.



**Figura 4.1: Exemplo de placas de PVC. Imagem adaptada de (DIAB Group AB, 2010).**

As placas do material são comumente utilizadas para a construção de cascos de estrutura naval, em especial em aplicações onde se utiliza estruturas sanduíche. Este material pode substituir o uso de compensados nas estruturas. Por apresentarem boa relação densidade resistência mecânica, também podem ser utilizados em aplicações aeronáuticas, em especial na construção de aeromodelos.

A espuma de PVC é comercializada em placas de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> e em diversas espessuras entre 4 mm e 80 mm. É possível também escolher o material em diferentes densidades nominais.

Apresentado o material, temos agora o objetivo de identificar as principais características mecânicas e constitutivas necessárias para a realização do projeto de um atenuador de impacto. Este capítulo é um resumo de resultados encontrados em diversos artigos científicos em torno do material, e servirá de base para o projeto.

### 4.1 Estrutura celular

As espumas, assim como estruturas em colmeia de abelha, são classificadas como materiais celulares. Estes materiais são caracterizados pela presença de material de base (metais, polímeros, ou cerâmicos) e gás. Nos materiais celulares, o

conhecimento da estrutura das células pode prever diversas propriedades mecânicas, como anisotropia e homogeneidade.

Algumas propriedades como a densidade relativa, o tipo de célula (fechada ou aberta) e o diâmetro médio dos poros podem também prever características mecânicas das espumas (Gibson, et al., 1999). Aqui, vamos nos limitar a indicação de que a espuma de PVC utilizada tem células abertas.

O conhecimento das características microscópicas da espuma pode prever comportamento mecânico do material em todas as direções. A literatura propõe modelos quantitativos para os módulos de Young, elasticidade não linear, densificação, indentação e até mesmo propriedades de fadiga do material baseado no tipo de estrutura celular e da densidade relativa (Gibson, et al., 1999).

O conhecimento qualitativo do mecanismo de deformação do material, assim como a influência de cada parâmetro é útil no projeto e na escolha do material. Entretanto, o detalhamento minucioso de cada detalhe não é trivial. O objetivo inicial do trabalho não é de expertise de materiais celulares, e sim de mecanismos de absorção de impacto. Logo, apresentaremos as principais características do material para a aplicação desejada, e nos contentaremos em identificar todas as propriedades necessárias para uma única densidade da espuma de PVC.

## **4.2 Densidade do Material**

Assim como qualquer outro tipo de espuma, a influência de densidade do material é muito importante. A densidade da espuma pode ser visto como o resultado da proporção material de base (PVC) em relação ao volume total da estrutura (PVC mais ar). Além de afetar o peso específico da espuma, a densidade relativa influencia em uma série de outras propriedades do material.

A tabela 4.1 abaixo ilustra a influência da densidade nas características do material. Ela é um resumo dos dados que são encontrados no catálogo do fabricante. Note que algumas classes do material foram desconsideradas na tabela. O conteúdo integral pode ser encontrado em (Diab Group, 2012).



**Tabela 4.1: Tabela comparativa das placas de diferentes densidades. Baseada nos dados fornecidos pelo fabricante (Diab Group, 2012).**

Propriedade		Unidade	Identificação do Material					
			H35	H60	H80	H100	H200	H250
Densidade Nominal		kg/m <sup>3</sup>	38	60	80	100	200	250
Elasticidade sob Compressão <sup>1</sup>	Módulo	MPa	40	70	90	135	310	400
	Limite	MPa	0.5	0.9	1.4	2.0	5.4	7.2
Elasticidade sob Tração <sup>1</sup>	Módulo	MPa	1.0	1.8	2.5	3.5	7.1	9.2
	Limite	MPa	49	75	95	130	250	320
Elasticidade sob cisalhamento	Módulo	MPa	0.4	0.76	1.15	1.6	3.5	4.5
	Limite	MPa	12	20	27	35	73	97
Deformação sob cisalhamento		%	9	20	30	40	45	45

1. Valores medidos em direção normal a espessura das placas  
Propriedades medidas à temperatura de 23°C

As placas são comercializadas pela densidade, e a nomenclatura é HXXX, onde XXX é a densidade nominal em kg/m<sup>3</sup>. Como é de se esperar, a resistência do material cresce à medida que a densidade da espuma aumenta.

Além da influência da densidade, a conclusão mais importante ao analisar esta tabela é o fato do material não ser isotrópico linear. O comportamento sob tração e compressão do material são diferentes. Além disso, é de se notar que os dados são válidos somente para esforços na direção normal à placa.

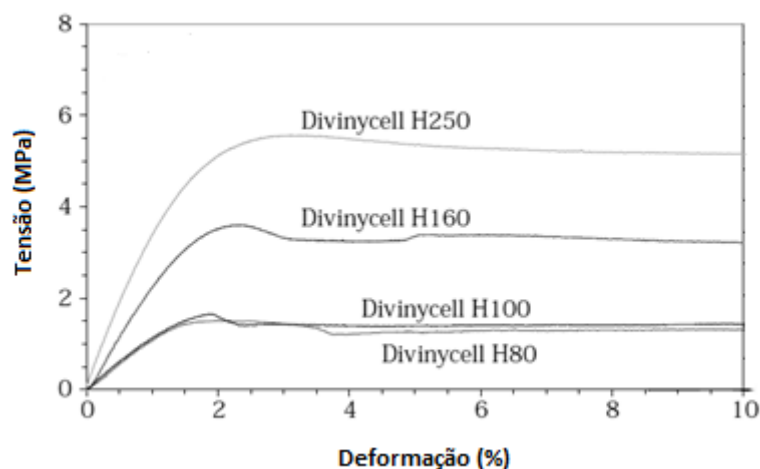
Além disso, a tabela é limitada às características do material no regime elástico. Para a aplicação do projeto, iremos trabalhar a na maior parte do tempo em regime de deformação plástica para a absorção de energia. Para isso, é necessária a análise das curvas de tensão deformação do material.

Os efeitos de direção da carga assim como a deformação sob o regime plástico serão discutidos de forma mais aprofundada nas seções seguintes.

### 4.3 Comportamento sob compressão

Vimos anteriormente o comportamento do material sob compressão para o regime elástico na seção anterior. Entretanto, a tabela não é suficiente para caracterizar o comportamento em altas deformações, como é necessário para o projeto do atenuador

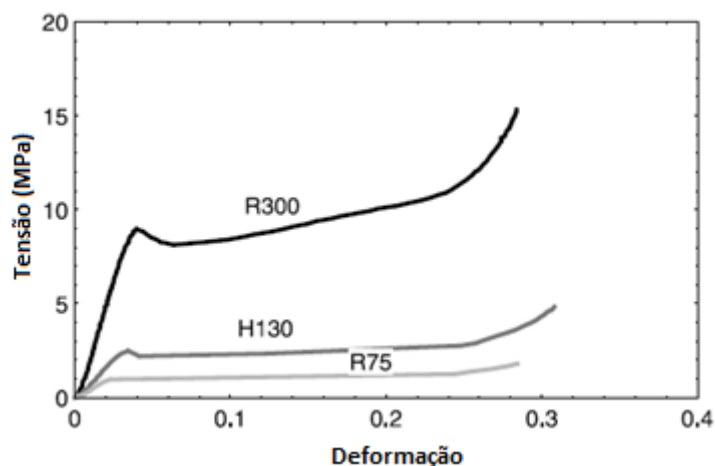
de impacto. Pensando nesse aspecto, apresentamos a seguir curvas típicas de tensão deformação do material.



**Figura 4.2: Curvas Tensão Deformação na direção normal ao plano. Adaptado de (Daniel, 2010)**

A figura 4.2 mostra a resposta do material à compressão na direção normal ao plano. Note que há um trecho linear, correspondente a deformação elástica do material, e depois há um trecho em que a tensão é mantida aproximadamente constante.

Repare que o gráfico mostra deformações até 10% do tamanho inicial. Para espumas poliméricas é um valor baixo, pois estas chegam a deformações de até 80% ou mais do tamanho original.



**Figura 4.3: Curva Tensão Deformação para diferentes espumas de PVC. Adaptado de (Thomas, et al., 2002)**

Na figura 4.3, podemos notar uma curva de compressão com uma deformação maior. Nela, é possível identificar as três fases clássicas: elasticidade, platô e

densificação. Esse fenômeno foi observado por (Maiti, et al., 1984), que caracterizou o comportamento de vários tipos de espuma.

A fase de elasticidade é uma resposta comum da maior parte dos materiais utilizados em engenharia: a tensão é diretamente proporcional à deformação do material, e é totalmente reversível. Este mecanismo de deformação em um material de célula fechada corresponde à flexão das paredes celulares e também ao alongamento dessas paredes. Como o material é um polímero, o comportamento elástico não é perfeitamente linear. Na realidade, é possível reparar um pequeno trecho não linear no início da curva, onde o material é extremamente flexível. Mas como este trecho é usualmente pequeno, a maioria dos modelos considera esta fase como elasticidade linear.

Na segunda fase, a parede das células do material sofrem flambagem seguida de colapso. Se o material é uniforme, a carga necessária para o colapso de cada uma das células é aproximadamente constante, e então a tensão necessária para comprimir o material também é constante. Logo, em escala macroscópica temos na curva tensão deformação um trecho horizontal, e por isso o nome platô presente na literatura.

Após o colapso de todas as células, todo o gás que estava presente dentro dos poros do material é expulso. Neste estágio, chamado de densificação, o material é aproximadamente um sólido, e não mais uma espuma. Então, o esforço necessário para comprimir um sólido cresce rapidamente, explicando o aumento repentino da tensão na curva tensão deformação.

É importante também notar que, apesar de não estar representada nos gráficos, a densidade relativa do material influi tanto na tensão de platô quanto na deformação onde começa o fenômeno de densificação (Gibson, et al., 1999). Quanto mais denso o material, mais resistente ele é, mas também mais rápido ocorre a densificação. Isso ocorre, pois, os espaços intracelulares são menores, e então são preenchidos mais rapidamente.

#### **4.3.1 Coeficiente de Poisson plástico**

Um ponto importante do mecanismo de deformação sobre compressão é o fato de que o coeficiente de Poisson durante a fase de platô é virtualmente zero. Este é um

ponto importante para a escolha do modelo de material para simulações por elementos finitos.

#### **4.4 Influência da taxa de deformação**

Todos os gráficos apresentados neste capítulo até o momento foram obtidos através de experimentos quase-estáticos. Entretanto, o projeto de um absorvedor de energia envolve impacto, que por sua vez está ligado a altas deformações em um curto período de tempo.

Se voltarmos para a caracterização da estrutura das células da espuma, vimos anteriormente que os poros estão preenchidos com gás. A literatura (Gibson, et al., 1999) prevê que a presença dos gases influencia na resposta macroscópica do material à deformação. O gás encapsulado é expulso das células durante a etapa de platô da deformação do material. A velocidade em que o gás é expulso resulta em um aumento aparente na rigidez da espuma, devido ao atrito viscoso. Logo, devemos esperar que, quanto maior a velocidade em que deformamos a espuma de PVC, mais rígida ela será.

A influência da inércia da estrutura no aumento de resistência da estrutura também foi discutida por (Calladine, et al., 1984). Entretanto, para estruturas microscópicas como a espuma de PVC, a conclusão é de que a inércia não possui grande influência na resposta sob altas taxas de deformação (Tagarielli, et al., 2008).

Por fim, alguns autores justificam o aumento da rigidez devido simplesmente à natureza visco-elástica do material de base, no caso o PVC. (Tagarielli, et al., 2008).

Alguns experimentos foram feitos para identificar o comportamento do material à diferentes taxas de deformação (Thomas, et al., 2002), (Luong, et al., 2013), entre outros. Os gráficos apresentados abaixo são de duas densidades diferentes da espuma de PVC, apresentados por e (Tagarielli, et al., 2008).

A figura 4.4 mostra curvas de tensão deformação para o material. É possível reparar que os resultados estão disponíveis para uma faixa distinta de taxas de deformação. Isso se explica pelo método utilizado para obtenção dessas curvas.

#### 4.4.1 Método experimental para a obtenção de curvas tensão-deformação a altas velocidades

Para taxas de deformação pequenas, uma prensa guiada por parafuso é adequada para o teste. Para faixas médias, entre  $0.01$  e  $250 \text{ s}^{-1}$ , relatos mostram que é possível obter este tipo de resultado através de prensas servo-hidráulicas com velocidade de compressão até  $1,5 \text{ m/s}$ , equipados com sensores LVDT para medir o deslocamento das placas compressoras (Tagarielli, et al., 2008).

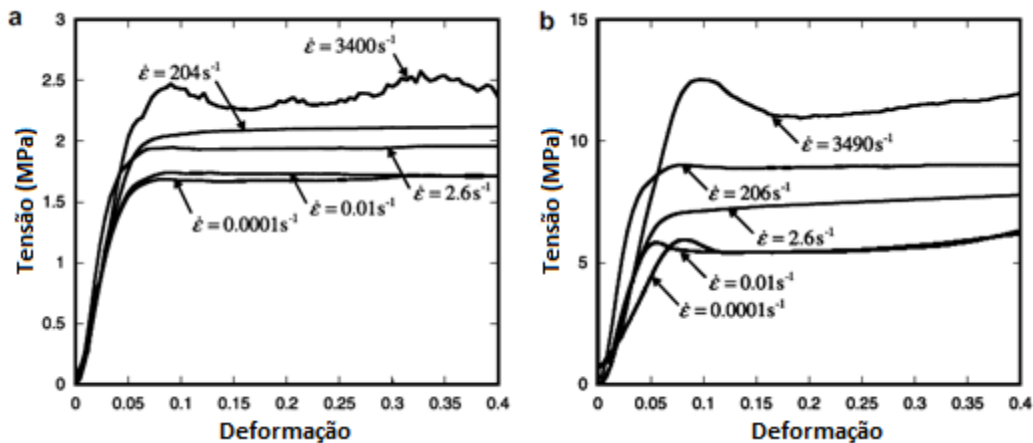


Figura 4.4: Curvas de Tensão-Deformação para diferentes velocidades de deformação. Foram testadas duas classes de espuma diferente: (a) H100 e (b) H250. Adaptado de (Tagarielli, et al., 2008)

Para altas taxas de deformação, a literatura mostra que é possível fazer experimentos com sistemas do tipo Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) modificados. O princípio de funcionamento do sistema é retratado no desenho esquemático abaixo:

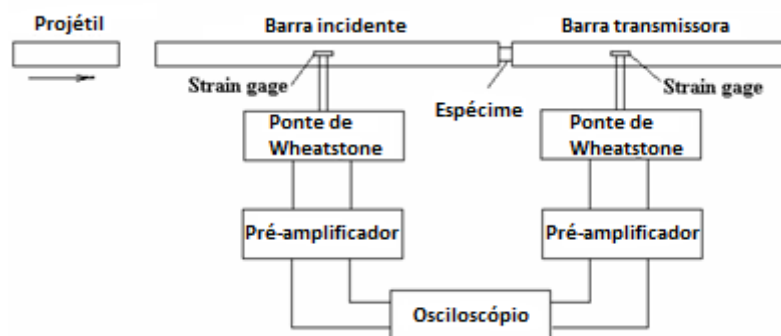


Figura 4.5: Desenho esquemático de um sistema Split Hopkinson Pressure Bar. Adaptado de (Chen, et al., 2010)

O aparato experimental consiste em três barras: o projétil, a barra incidente e a barra de transmissão. Um espécime do material que desejamos caracterizar é

posicionado entre as barras incidente e de transmissão. A barra de impacto é acionada por uma pistola pneumática, e esta se choca com a barra incidente produzindo uma onda mecânica. Por causa da diferença de impedância entre as barras, parte da onda é incidida sobre o espécime e outra parte é refletida. As barras incidente e de transmissão são instrumentadas com strain-gages para que seja possível comparar as ondas refletidas e transmitidas. Com a medição das três ondas, é possível calcular a resposta em tensão, deformação e taxa de deformação, sendo assim possível obter curvas tensão deformação para altas taxas de deformação.

Para matérias com módulo de elasticidade baixo, como a espuma de PVC, são feitas modificações nas barras incidente e de transmissão para aumentar a qualidade do sinal. Algumas das táticas para aumentar a qualidade dos resultados é a adoção de barras de transmissão mais longas, espécimes ocos, técnicas de controle do formato do pulso mecânico, além de tratamento matemático do sinal para eliminação de efeitos de inércia, deformação transversal, entre outros.

A complexidade para se obter os dados para o material se tornam óbvias depois de uma breve descrição dos métodos experimentais envolvidos. A realização de experimentos desta natureza mostrou-se inviável. Na seção a seguir, mostramos uma solução alternativa para computar o efeito da taxa de deformação.

#### 4.4.2 Lei da Potência

Devido à dificuldade de atingir dados de tensão deformação para algumas taxas de deformação, Tagarielli et al. propuseram uma lei para se obter se estimar a influência da taxa de deformação do material (Tagarielli, et al., 2008). Ele propôs a seguinte lei de potência:

$$\frac{\sigma_{pl}(\dot{\epsilon})}{\sigma_o} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_o} \right)^m \quad (4-1)$$

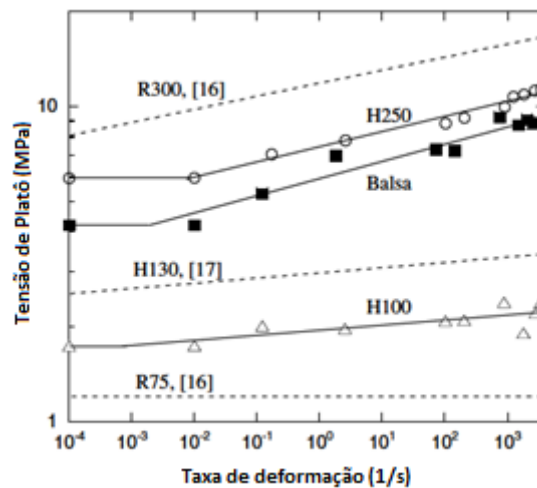
Onde:

- $\sigma_{pl}(\dot{\epsilon})$  – Valor da tensão de platô para a taxa de deformação  $\dot{\epsilon}$ .
- $\dot{\epsilon}$  – Taxa de deformação
- $\dot{\epsilon}_o$  – Taxa de deformação de referência. É uma escolha arbitrária.
- $\sigma_o$  - Tensão de platô para a taxa de deformação  $\dot{\epsilon}_o$  escolhida.

A proposição desta lei foi baseada em resultados experimentais obtidos pelo próprio autor, e também baseado em resultados publicados por (Walley, et al., 1994) para o material puro PVC. A hipótese apresentada pelo Tagarielli é que, se o material de base obedece a uma lei de potência, é razoável imaginar que a espuma também apresente tal comportamento.

Note que uma fragilidade da lei é que ela não prevê taxas de deformações muito pequenas. No caso em que  $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ ,  $\sigma_{pl}(\dot{\epsilon}) \rightarrow 0$ , o que não é verdade. De fato, quando as taxas de deformação são pequenas, o caso quase-estático é válido, e então podemos considerar  $\sigma_{pl}(\dot{\epsilon})$  constante.

Os resultados das aproximações de Tagarielli são demonstradas no gráfico da figura 4.6. Luong et al. também apresentam alguns resultados satisfatórios de ajuste de lei de potência para uma outra classe de espumas de PVC (Luong, et al., 2013).



**Figura 4.6: Resultado comparativo do ajuste de lei de potência para os dados experimentais. Adaptado de (Tagarielli, et al., 2008).**

O resultado apresentado é satisfatório para fins de projeto. Ele resolve o problema de realizar os experimentos em taxas de deformação intermediárias, pois fornece um meio de interpolar as situações mais complicadas e obter uma estimativa para o projeto.

A tabela 4.2 resume os resultados numéricos obtidos, encontrados na literatura. Esses valores são importantes, e serão utilizados nos próximos capítulos.

**Tabela 4.2: Resumo dos parâmetros encontrados na literatura para a lei de potência.**

<b>Identificação do Material</b>	<b><math>\sigma_0</math></b>	<b><math>m</math></b>
H100 <sup>1</sup>	1.95	0.016
H250 <sup>1</sup>	7.44	0.048
HP60 <sup>2</sup>	1.04	0.029
HP100 <sup>2</sup>	2.34	0.031
HP200 <sup>2</sup>	7.11	0.033
HP1250 <sup>2</sup>	8.40	0.025
PVC Sólido <sup>1</sup>	86.85	0.050

1. Resultados apresentados em (Tagarielli et Al., 2008)

2. Resultados apresentados em (Duong et Al., 2013)

## **4.5 Outras propriedades do material**

### **4.5.1 Comportamento em outras direções**

A literatura também apresenta resultados sobre esforços em outras direções. Curvas de tensão deformação são apresentadas para carregamento de tração e cisalhamento em (Daniel, 2010), (S.T. Taher, 2011), (Gdoutos, et al., 2002), entre outros.

Como o projeto do absorvedor de impacto tem apenas esforços de compressão em uma única direção, não entraremos em grandes discussões sobre o comportamento do material em outras direções.

### **4.5.2 Influência da Temperatura**

Uma das características do PVC é o fato dele ser um polímero termoplástico. A temperatura, portanto pode afetar as propriedades mecânicas da espuma de PVC. Thomas e al. estudaram o efeito do aumento de temperatura da espuma nas propriedades mecânicas (Thomas, et al., 2002) e (Thomas, et al., 2004).

Os resultados mostram que o aumento de temperatura pode diminuir a rigidez do material, e assim perder capacidade de absorver energia. Entretanto, para temperaturas até 50°C não há variação significativa em espumas de densidade inferior a 130 kg/m<sup>3</sup>. Em casos de alta taxa de deformação, a influência da temperatura é ainda menor.

Portanto, como conclusão, as possíveis mudanças de temperatura ambiente não devem diminuir o desempenho de absorção de impacto da espuma de PVC.



### **4.5.3 Influência da umidade**

Como foi dito anteriormente, placas de espuma de PVC são comumente utilizadas para a construção de cascos de embarcações marítimas. Logo, é de se esperar que o material tenha uma boa resistência à umidade.

De fato, alguns estudos mostram que a degradação das propriedades mecânicas da espuma é pequena quando ela é imersa em água (Avilés, et al., 2010). Como o atenuador de impacto não será exposto à água durante longos períodos de tempo, não se mostrou necessário o encapsulamento do material.

### **4.5.4 Métodos de fabricação**

O fabricante do produto faz uma série de recomendações para a usinagem da espuma de PVC em seu catálogo técnico (Diab Group, 2012). De forma geral, o material pode ser usinado através de processos de corte com serras e serra de fita, fresadoras e torneamento, apesar do último usualmente apresentar complicações para prender a peça na máquina. Por ser um material difícil de ser usinado, os projetos utilizando espuma de PVC devem ser limitado a geometrias simples.

Foram realizadas algumas tentativas dentro do laboratório para usinar o material, durante a fabricação dos corpos de prova para os experimentos relatados neste texto. Operações de fresamento mostraram acabamento superficial razoável quando utilizados alta velocidade de corte a pequeno passo. Por outro lado, devido a limitações dos equipamentos em relação à usinagem de peças de grandes dimensões, algumas peças mostraram-se viáveis apenas através de processos mais manuais como uso de serra circular e arco de serra. Apesar de chegar a bons acabamentos superficiais, as tolerâncias geométricas obtidas foram da ordem de 1 ou 2 mm.

Alguns artigos mencionam o uso de corte por puncionamento para a obtenção de corpos de prova com alta repetibilidade, em especial para geometrias cilíndricas (Tagarielli, et al., 2008).

Foi considerado também o uso de técnicas de fio quente, processo usualmente utilizado para cortar isopor em geometrias difíceis, principalmente por entusiastas de aeromodelismo. Entretanto, indicações em fóruns, assim como no próprio catálogo do fabricante, indicam que o PVC libera gases tóxicos quando queimados, fazendo com que a técnica em questão seja inadequada para este tipo de material.

Como foi dito anteriormente, as placas são vendidas em espessuras de até 80mm. Para espessuras maiores, é possível colar múltiplas placas empilhadas até se chegar na espessura desejada. Para unir as placas, o fabricante recomenda o uso de adesivo à base de epóxi, para melhores resultados. Inclusive, este método foi adotado para chegar à geometria final de projeto.

## 5 Projeto do Atenuador de Impacto

Após discussão sobre absorvedores de impacto e o detalhamento das principais características do material espuma de PVC, vamos finalmente dar início ao projeto do absorvedor de impacto.

Antes de começar o detalhamento das escolhas de projeto, vamos resumir os objetivos do projeto para tornar a explicação das decisões mais claras.

**Tabela 5.1: Resumo dos objetivos de projeto do atenuador de impacto.**

<b>Objetivo Principal</b>	
Projetar um dispositivo atenuador de impacto para o caso de colisões frontais Em caso de colisão fora de eixo ou fora de centro, ser capaz de absorver energia.	
<b>Objetivos Secundários</b>	
Minimizar o peso do absorvedor de impacto Minimizar o volume do absorvedor de impacto	
<b>Parâmetros do projeto</b>	
<b>Valores numéricos da colisão</b>	
Massa de Colisão	300 kg
Velocidade Inicial	7 m/s
Capacidade de Absorção de energia	7350 J
<b>Dimensões do absorvedor de impacto</b>	
Largura Mínima	200 mm
Altura Mínima	100 mm
Comprimento Mínimo	200 mm
<b>Montagem</b>	
Integrado a parte frontal do chassi tubular	
Altura do quadro frontal	300 mm
Largura do quadro frontal	200 mm
Parafusos M8	4 unidades
<b>Placa anti-intrusão</b>	
Espessura mínima	
Alumínio	4 mm
Aço	1,5 mm
Deformação máxima	25,4 mm

Para servir como referência, é possível encontrar no anexo um resumo das regras da competição referentes ao atenuador de impacto traduzidas para o português.

## 5.1 Escolha do material

Como foi dito anteriormente, o material escolhido foi espuma de PVC, da linha *Divinycell*, fabricado pela *Diab Corp.* Vimos também que a espuma pode ser fornecida em diversas densidades e espessuras.

Após a análise simplificada do problema, como foi visto anteriormente, foi escolhido para o projeto a espuma de densidade nominal de  $60 \text{ kg/m}^3$ , em placas de 50 mm. A densidade escolhida foi baseada em alguns fatores: Primeiro, as classes  $60 \text{ kg/m}^3$ ,  $100 \text{ kg/m}^3$  e  $250 \text{ kg/m}^3$  são as que mais têm estudos científicos publicados sobre o material. O conhecimento disponível torna o comportamento do material mais previsível, facilitando as etapas do projeto, em especial antes da realização de experimentos.

Além disso, uma análise preliminar mostrou que as densidades de 60 e  $100 \text{ kg/m}^3$  são mais compatíveis com a força de desaceleração que deve ser exercida no projeto. A densidade  $250 \text{ kg/m}^3$  tem tensão de platô tão elevada que a menor seção transversal permitida no projeto já implica em uma aceleração média maior que 20 g.

Entre as duas classes que restaram, foi escolhida a H60, pois ela permite uma maior deformação à tensão constante. Como já havia sido explicado antes na seção sobre o material, quanto menos densa é a espuma, maior a capacidade de se deformar antes da densificação. Testes mostraram que a ponto de deformação onde começa a densificação é de aproximadamente 60% do volume.

Além da questão citada acima, o fato de a espuma escolhida ter menor tensão escoamento permite maior flexibilidade escolha da razão altura por largura da seção transversal, além de minimizar a variação da força na seção transversal variável ao longo do comprimento.

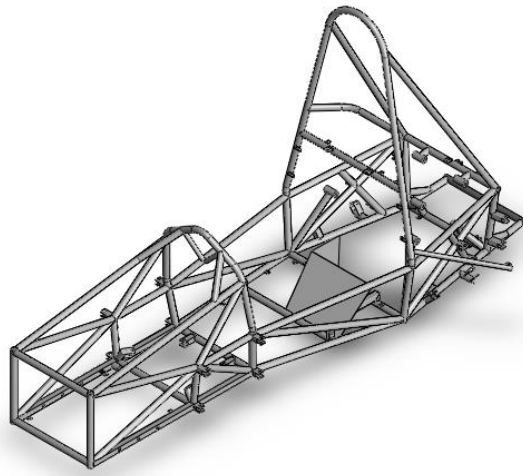
Finalmente, a espessura de 50 mm para a espuma de PVC foi uma escolha arbitrária em função da facilidade de fabricar atenuadores de comprimentos múltiplos de 50 mm, seja 200 mm, 250 mm ou 300 mm.

## 5.2 Chassi do Veículo

O projeto do veículo da equipe é baseado em um chassi tubular em aço. Tubos de diferentes diâmetros são soldados para fazer a parte estrutural do veículo. O trabalho

não tem como objetivo propor otimizações ao projeto da estrutura, apenas as mínimas modificações para que o projeto do atenuador de impacto seja adequado.

O absorvedor deve ser montado ao quadro frontal da estrutura, também chamado de “*bulkhead*”. Este é a parte frontal mais externa da estrutura. Além disso, o atenuador deve ser encoberto pelo bico da carenagem. Logo, o comprimento do absorvedor influencia no projeto da carenagem. O desenho esquemático ilustra a geometria da parte frontal da estrutura, o posicionamento do atenuador de impacto assim como o bico da carenagem.



**Figura 5.1: Representação 3D do chassi tubular do veículo**

Portanto, é necessário que o comprimento e a largura do dispositivo atenuador de impacto sejam inferiores as dimensões do *bulkhead*. Além disso, quanto menor o comprimento do atenuador, menor pode ser o bico do carro.

### **5.3 Geometria do atenuador de impacto**

Segundo as regras da competição, o atenuador de impacto deve ser maior que um paralelepípedo com 200 mm de largura, 100 mm de altura e 200 mm de comprimento. O comportamento da curva de tensão deformação indica que um simples corpo sólido de espuma de PVC, sem furos ou vazios, pode ser um design válido e funcional para o atenuador de impacto. Logo, a geometria de um paralelepípedo seria a primeira opção a ser considerada.

Entretanto, existem alguns motivos para adotar uma geometria um pouco mais complexa. Primeiro, podemos pensar que a colisão frontal não é necessariamente centrada ou alinhada com o eixo longitudinal do carro. O formato de paralelepípedo

seria ótimo em um caso perfeito, mas como não é possível controlar estes pequenos desvios, uma geometria diferenciada se torna uma melhor decisão.

Seguindo tendências de outros atenuadores de impacto, como, por exemplo, embalagens de equipamentos eletrônicos, um formato trapezoidal foi escolhido para o atenuador. Além de ser capaz de absorver melhor impacto com ligeiros ângulos de inclinação, apresentam também melhor estabilidade contra flambagem, problema verificado em casos experimentais e mostrado no capítulo 5 deste trabalho.

É possível encontrar na literatura artigos que estudam a influência do ângulo de inclinação de um absorvedor de impacto. Em (Masso-Moreau, et al., 2003), foi estudado diferentes ângulos de inclinação para as faces laterais, incluindo geometrias em formato de pirâmide (com 4 faces inclinadas).

Geometrias piramidais foram consideradas na etapa de projeto, mas foram descartadas pela dificuldade de fabricação. A fabricação de uma pirâmide é difícil, pois, após usinar lados opostos inclinados, não é mais possível ter uma face de referência onde o ângulo da face a ser usinada. Se a peça for feita em uma máquina fresadora, é difícil prender a peça sem ter um gabarito especial. Vale ressaltar que tal vantagem de fabricação pode ser invertida em alguns processos de fabricação em larga escala. Se pensarmos que uma empresa especializada em polímeros possa obter o atenuador de impacto já na geometria final a partir da expansão da espuma dentro de um molde, ou então se utilizarmos um processo de conformação térmica, conforme o fabricante indica, a geometria piramidal leva vantagem, pois as inclinações das faces facilitam a retirada da peça do molde.

A escolha da geometria trapezoidal tem como desvantagem a maior dificuldade de prever o comportamento do atenuador, tanto em relação a capacidade de absorção de energia quanto a força necessária para deforma-lo, que está ligado diretamente a desaceleração imposta ao veículo. Um atenuador com seção transversal constante implicaria, idealmente, uma desaceleração também constante.

### **5.3.1 Escolha da seção transversal**

A escolha da seção transversal é talvez a escolha mais difícil do projeto. Existe modelo analítico para materiais que tem comportamento semelhante à espuma de PVC, com uma região plástica de platô seguida por densificação. Entretanto, o modelo foi

desenvolvido para materiais que não possuem efeito visco-elástico, e portanto, não é adequado para o problema em questão.

Devido às propriedades constitutivas dependentes da velocidade de deformação e devido à seção transversal variável, é difícil chegar a uma expressão analítica que seja válida.

Mesmo com o modelo teórico, as dimensões finais foram obtidas com base nos resultados obtidos pelas simulações computacionais e também com os resultados dos experimentos dinâmicos. Como este foi um processo iterativo, sem explicações óbvias de como foi procedido, neste instante nós estamos limitados a indicar apenas dados da geometria final da peça.

#### **5.4 Integração do atenuador de impacto ao veículo.**

Segundo a regra da competição, o atenuador de impacto deve ser integrado à estrutura através de 4 parafusos M8. Além disso, entre o atenuador e o chassi deve ser montada uma placa anti-intrusão para evitar que o atenuador entre dentro do *cockpit*.

O projeto dos anos anteriores previa a placa anti-intrusão soldada ao *bulkhead*, logo, o atenuador de impacto e a placa poderiam ser montadas separadamente. Para o projeto atual, foi tomada a decisão de unir o atenuador à placa anti-intrusão em alumínio através do adesivo a base de epóxi, o mesmo utilizado para unir as placas da espuma de PVC. A chapa de alumínio, por sua vez, será montada ao chassi através de 4 parafusos, conforme solicitado pela regra.

Como o projeto do ano anterior, o atenuador era aparafusado na placa, não era necessário furar os tubos do *bulkhead*. Entretanto, o novo projeto terá 4 furos, então é necessário, também pela regra, soldar alguns reforços nesse tubo.

Para reforçar a resistência da placa anti-intrusão, foi proposto também a inclusão de 3 tubos soldados em “X” no *bulkhead*, de forma que, em caso de colisão, a placa de alumínio não sofra grandes deformações ou mesmo fratura.

Todas as modificações propostas à estrutura, assim como os desenhos de projeto do atenuador de impacto encontram-se no anexo.

## 5.5 Resumo do Projeto

O desenho do atenuador de impacto, assim como a montagem da integração do mesmo à estrutura se encontra nos anexos. A tabela 5.2 resume algumas dimensões finais do atenuador de impacto.

**Tabela 5.2: Dimensões de projeto do atenuador de impacto.**

Dimensões do Atenuador de Impacto		
Altura	250	[mm]
Largura na face inferior	300	[mm]
Inclinação das faces laterais	10	[graus]
Largura na face superior	194	[mm]
Profundidade	200	[mm]
Massa de Projeto	0,77	[kg]



## 6 Experimento Quase-Estático

Vimos diversas propriedades da espuma de PVC no capítulo sobre a caracterização do material. O aspecto da curva tensão-deformação, o comportamento aparente de coeficiente de Poisson nulo, e o aumento de rigidez do material com o aumento da taxa de deformação são algumas das características mais importantes, e que mais influenciam o projeto do atenuador de impacto.

Com a leitura das informações disponíveis na literatura, é possível prever os comportamentos citados acima, mas é difícil quantificar o efeito de cada um desses comportamentos. Portanto, para ter dados suficientes para realizar um projeto coerente para o atenuador de impacto, são propostos diversos experimentos de compressão uniaxial.

Estes experimentos foram conduzidos no Laboratório de Aulas Práticas e Metalografia, do departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da COPPE/UFRJ. O equipamento utilizado foi uma máquina universal para ensaios de tração, compressão ou cisalhamento. O equipamento é acionado por um conjunto eletromecânico através de fusos de esferas recirculantes, colunas-guia e servo controle.

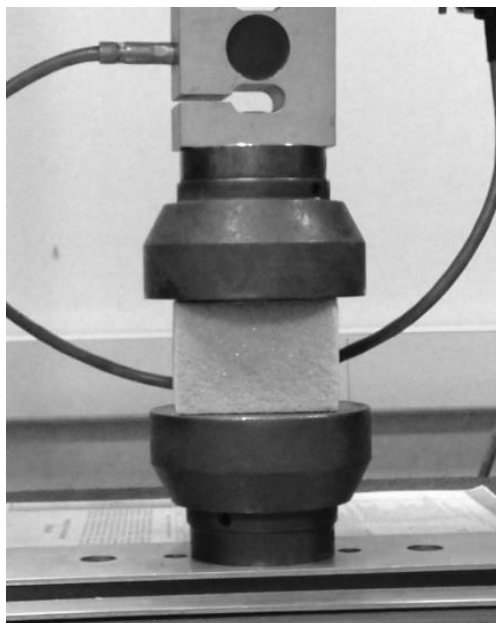


**Figura 6.1 : Imagem ilustrativa do equipamento utilizado.**

A célula de carga do equipamento tem a sua faixa ótima de medição entre 1 kN e 10 kN. Em termos de resultados, uma análise dos dados de saída mostra que os dados são gravados a uma frequência aproximada de 60 Hz, e força e deslocamento são medidos com precisão da ordem de 1 N e 1  $\mu$ m.

A compressão do corpo de prova é feita por dois apoios com faces planas circulares. O diâmetro do apoio é de 100 mm. O apoio inferior permanece parado,

enquanto o superior se desloca com o auxílio do mecanismo servo-mecânico. A posição do apoio superior é ajustada manualmente, com auxílio da medição da célula de carga, para que o experimento se inicie com o contato do mesmo com o corpo de prova. A velocidade de deformação é um parâmetro fornecido ao sistema na preparação para o experimento.



**Figura 6.2: Imagem do corpo de prova sendo posicionado para a realização do experimento.**

Foram propostos diversos ensaios, com variações na velocidade de deformação, na altura do corpo de prova, para identificar possíveis influências nas taxas de deformação, assim como no fato da utilização do adesivo para colar uma ou mais camadas de placa. Outros parâmetros, como a área transversal do corpo de prova, foram mantidos iguais para todos os ensaios. As tabelas abaixo mostra um resumo do planejamento dos ensaios.

Temos, portanto, os três primeiros ensaios idênticos, para verificarmos possíveis variâncias estatísticas durante os experimentos, e testar a confiabilidade dos resultados obtidos. Os ensaios de 4 a 6 são ensaios com corpos de prova com diferentes alturas. O objetivo é de verificar se a presença do adesivo altera o comportamento do material. Repare que as velocidades do experimento são ajustadas para que a velocidade de deformação seja a mesma para todos. Finalmente, os ensaios 7 a 10 foram realizados para verificar a influência da taxa de deformação na curva de tensão deformação.

**Tabela 6.1: Resumo de alguns parâmetros comuns a todos os ensaios**

Área Transversal	70x70	[mm x mm]
Área Transversal	4900	[mm <sup>2</sup> ]
Altura das camadas	50	[mm]
Tensão Média Esperada	0,9	[MPa]
Força Média Esperada	4,41	[kN]
Deformação máxima planejada	0,8	[mm/mm]

**Tabela 6.2: Resumo dos ensaios de compressão realizados**

ID	Altura [mm]	Velocidade do Experimento [mm/min]	Taxa de Deformação [(mm/mm)/s]	Anotações
1	50	30	0,01	Influência da Dimensão e verificação estatística dos resultados
2	50	30	0,01	
3	50	30	0,01	
4	100	60	0,01	Influência da presença de mais de uma camada
5	150	90	0,01	
6	200	120	0,01	
7	50	3	0,001	Influência da Taxa de deformação
8	50	300	0,1	
9	100	6	0,001	
10	100	600	0,1	

Os corpos de prova foram fabricados utilizando ferramentas para cortar madeira, como serra circular portátil e arco de serra, e para corrigir imperfeições do processo de corte, foi utilizado também lixa para madeira. Repare que este processo de fabricação teve como resultado peças com tolerância dimensional de +/- 2 mm.

## 6.1 Tratamento de dados

Além das curvas de tensão deformação, é importante identificarmos valores como a tensão de pico, a tensão de platô e o ponto de densificação. Estes são alguns parâmetros necessários para os modelos teóricos. A seguir, será explicitado o método de cálculo utilizado para identificar cada uma dessas propriedades.

### 6.1.1 Tensão de Pico

A tensão de escoamento marca o limite entre os comportamentos elástico e plástico do material. Usualmente, esta tensão calculada através do desvio da curva de

tensão em relação ao trecho linear elástico. Entretanto, a espuma de PVC é um material em que o comportamento elástico não é exatamente linear. Por este e outros motivos, vamos identificar a tensão de pico, e vamos usa-la para identificar as outras propriedades do material.

A tensão de pico é a tensão máxima antes de o material entrar em regime de platô. Para identificar este pico, pode-se utilizar a propriedade de máximo local:

$$\sigma_{pico} = \sigma(\varepsilon_p) \mid \left. \frac{\partial \sigma(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon_p} = 0 \quad (6-1)$$

Por outro lado, é necessário utilizarmos a expressão de forma discretizada. Utilizamos então propriedades de diferenças finitas centradas, temos:

$$\frac{\partial \sigma(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \cong \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}} \quad (6-2)$$

Outro cuidado que deve ser tomado é que, por se tratar de dados discretos, não acharemos um valor de derivada exatamente igual à zero. Logo, a tensão de pico é identificada quando o valor da derivada troca de sinal. Finalmente, temos:

$$\varepsilon_{pico} = \varepsilon_i \mid \begin{cases} \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}} < 0 \\ \frac{\sigma_i - \sigma_{i-2}}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-2}} > 0 \end{cases} \quad (6-3)$$

### 6.1.2 Ponto de densificação

O ponto de densificação é o ponto de transição entre os regimes de platô e de densificação do material. Este ponto é importante para modelos teóricos, assim como para o cálculo da tensão de platô.

Para realização do calculo, foi adotado o método apresentado em (Tan, et al., 2005). Para tal, precisamos primeiro identificar duas propriedades: energia absorvida por unidade de volume, e a eficiência energética da espuma.

A energia por unidade de volume é a quantidade de energia que o material é capaz de absorver sob compressão uniaxial, calculado a partir da curva tensão deformação. A energia absorvida até uma deformação  $\varepsilon_a$  arbitrária é dada por:

$$w(\varepsilon_a) = \int_0^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6-4)$$

Para realizar a integração numérica, vamos utilizar a regra trapezoidal:

$$w(\varepsilon_n) \cong \sum_{i=1}^{i=n} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \quad (6-5)$$

A eficiência energética é definição como a energia absorvida pelo material até  $\varepsilon_a$ , dividido pela tensão neste mesmo ponto. Matematicamente, temos:

$$E(\varepsilon_a) = \frac{w(\varepsilon_a)}{\sigma(\varepsilon_a)} \quad (6-6)$$

Finalmente, a deformação de densificação pode ser visto como o ponto onde a eficiência energética é máxima, ou em termos matemáticos:

$$\left. \frac{dE(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (6-7)$$

Para identificar o ponto de densificação, será utilizado novamente aproximação por diferenças finitas, e um método semelhante à equação(6-3 6-3 para verificar o valor de derivada igual a zero.

### 6.1.3 Tensão de Platô

Identificados a deformação nos pontos de pico de tensão e de densificação, a tensão de platô é calculada simplesmente realizando a média das tensões entre esses dois pontos.

$$\sigma_{pl} = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_p} \int_{\varepsilon_p}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6-8)$$

Para realizar a integração, utilizamos novamente a regra trapezoidal.

$$\sigma_{pl} \cong \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_p} \left( \sum_{i=1}^{i=n} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \right), \text{ onde } \begin{cases} \varepsilon_0 = \varepsilon_p \\ \varepsilon_n = \varepsilon_d \end{cases} \quad (6-9)$$

### 6.1.4 Tensões normalizadas

Como foi citado anteriormente, foram realizados experimentos com diferentes velocidades de ensaio, para simular diferentes taxas de deformação. Para comparar resultados entre ensaios, os resultados foram normalizados utilizando a lei de potências, conforme a equação a seguir:

$$\sigma_{norm} = \sigma_{medido} \left( \frac{\dot{\epsilon}_{ensaio}}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right)^m \quad (6-10)$$

Para os fins de calculo, foram adotados  $\dot{\epsilon}_{ref} = 0,001$  e  $m = 0,016$ .

## 6.2 Resultados

Realizados os ensaios, devemos analisar os resultados obtidos. Primeiro, vamos analisar as curvas de tensão deformação, e em seguida vamos analisar as outras propriedades. Vamos começar pelo gráfico dos três primeiros ensaios, com corpos de prova e velocidade de experimento idênticos.

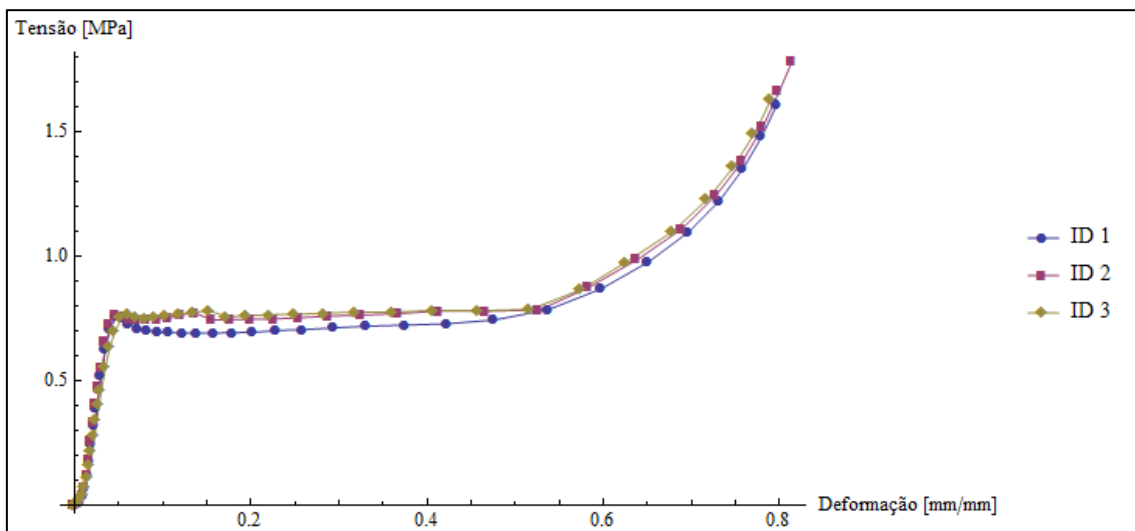
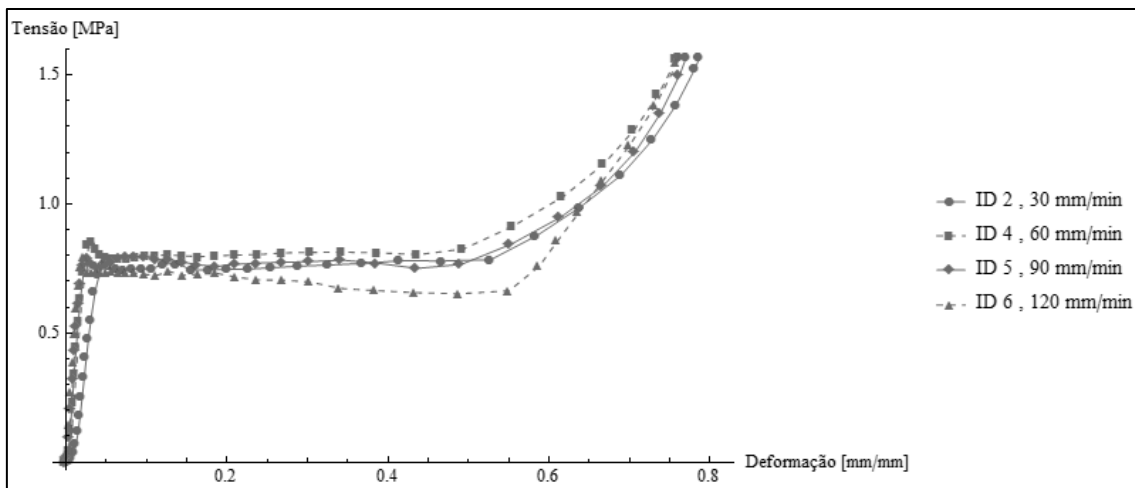


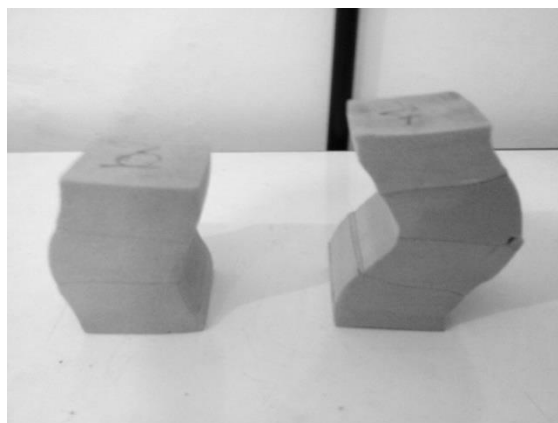
Figura 6.3: Ensaios de compressão à taxa de deformação constante, igual a  $0,01 \text{ s}^{-1}$

Uma análise preliminar do gráfico mostra que o comportamento da espuma foi dentro do esperado, com base em gráficos encontrados na literatura. Uma observação curiosa é de que a amostra 1 tem um comportamento ligeiramente diferente aos demais, por apresentar uma tensão de platô ligeiramente inferior e apresentar também um pico de tensão no escoamento.



**Figura 6.4:** Ensaios de compressão à taxa de deformação constante de  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , diferentes alturas. Legenda do gráfico: ID, altura do corpo de prova, velocidade do experimento.

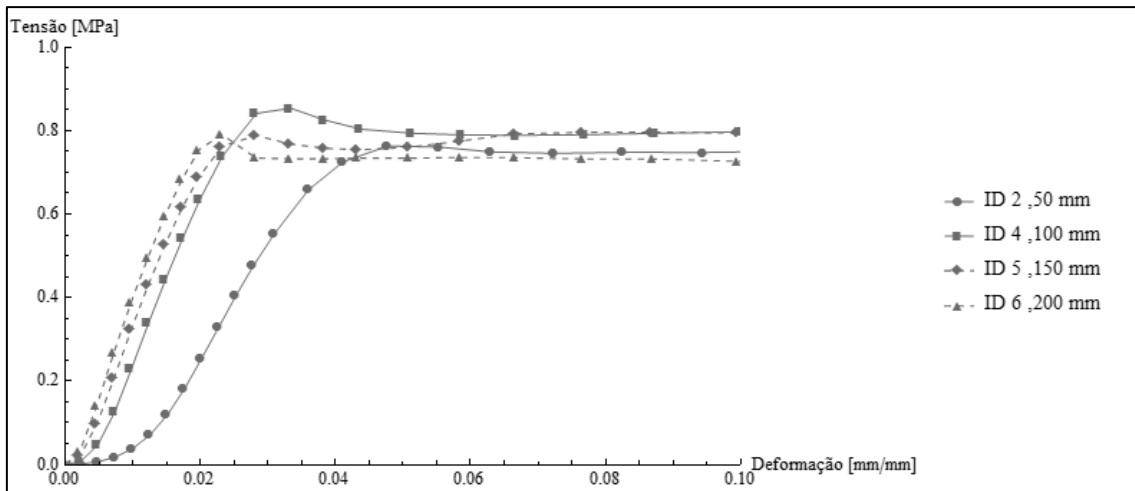
Para a segunda bateria de ensaio, vemos novamente que os resultados são coerentes, com exceção dos corpos de prova 5 e 6. Na realidade, estes sofreram flambagem durante o ensaio, e portanto, devem ser desconsiderados na avaliação estatística do comportamento do material no regime plástico.



**Figura 6.5:** Corpos de prova com 150 mm e 200 mm de altura, após a realização do ensaio quase-estático. É possível reparar que ambos sofreram flambagem.

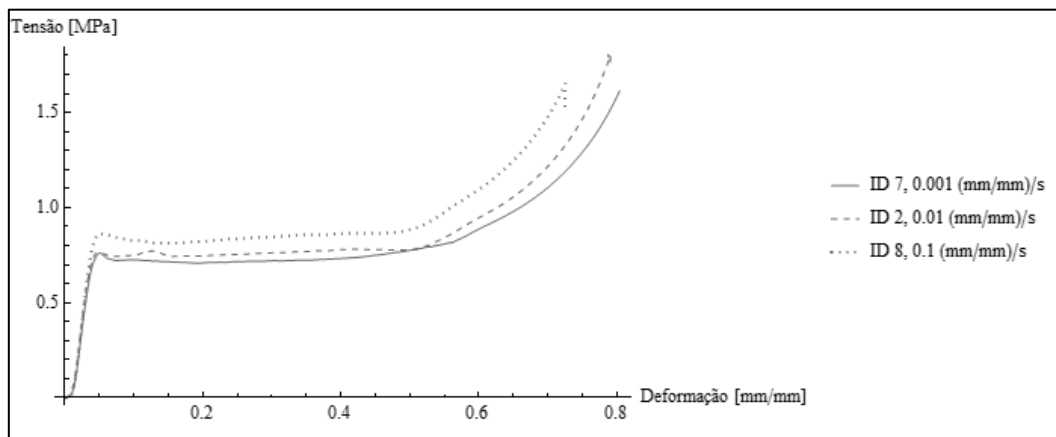
Outra observação interessante a ser feita é na diferença de comportamento da amostra com a presença da camada adesiva de resina. Se observarmos apenas o trecho elástico, é possível observar que o comportamento é mais linear nos corpos de prova 4, 5 e 6. O gráfico em detalhe, representado na figura 6.6, mostra ainda que há um comportamento aparente de aumento de rigidez com a presença do adesivo. Curiosamente, as tensões de escoamento e de platô não são influenciadas pelo aparente aumento de rigidez. Este é um indicador de que a parametrização do modelo numérico

com uma curva de tensão obtida em ensaio com corpo de prova de 100 mm deve ser mais coerente do que o de 50 mm.



**Figura 6.6: Detalhe do trecho elástico para os ensaios com corpos de prova de diferentes alturas.**

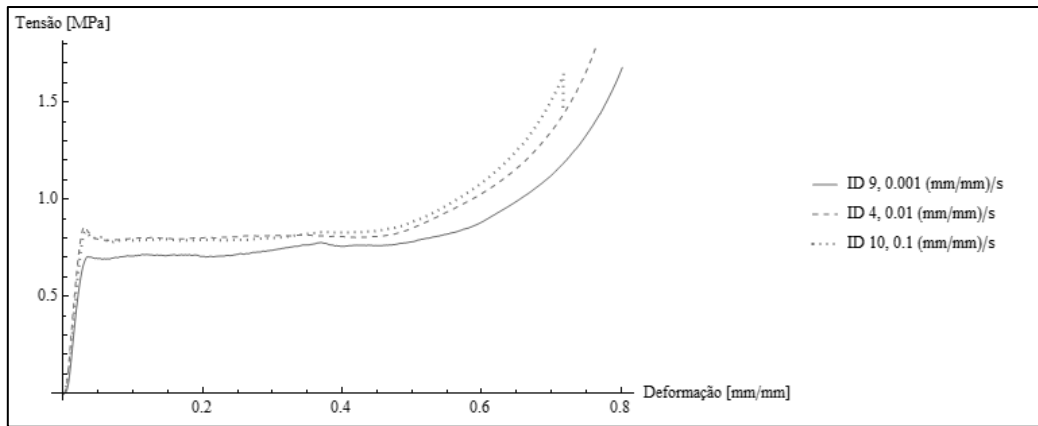
Devemos agora analisar a influência da taxa de deformação nos ensaios. Vamos primeiro analisar os corpos de prova com 50 mm de altura.



**Figura 6.7: Ensaios com diferentes taxas de deformação, corpo de prova com altura de 50 mm.**

Como era de se esperar, os ensaios mostraram que a tensão é maior quando a taxa de deformação é maior. Visualmente, podemos reparar que os ensaios 7 e 2 estão próximos, a diferença de taxa de deformação não é grande em comparação ao ensaio 8.

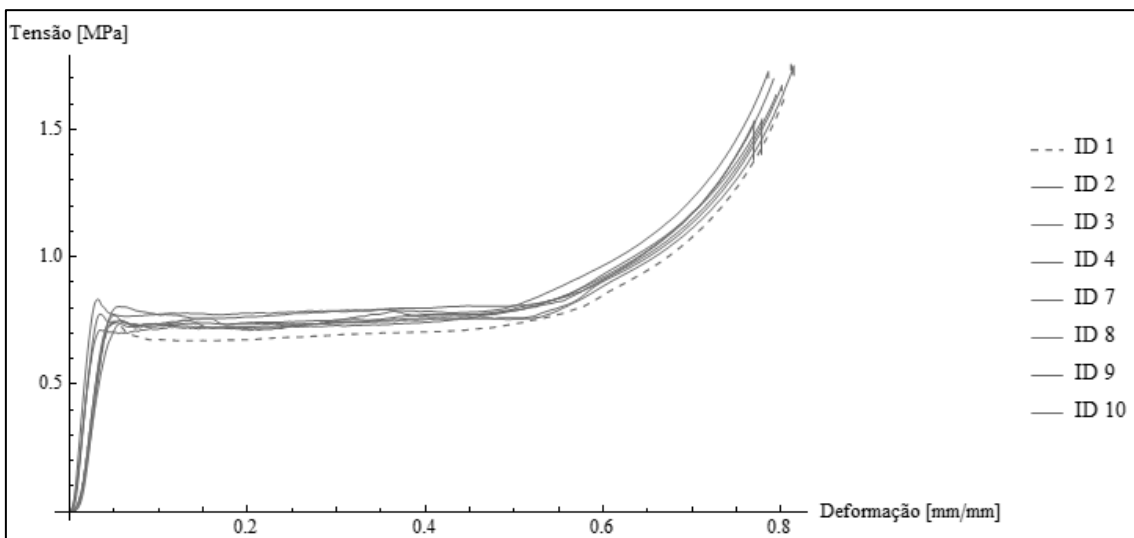




**Figura 6.8: Ensaio com diferentes taxas de deformação, corpo de prova com altura de 100 mm.**

Já nas peças com 100 mm de altura, os resultados não foram coerentes com os anteriores, pois as curvas com taxa de deformação  $0.01 \text{ s}^{-1}$  e  $0.1 \text{ s}^{-1}$  se mostraram equivalentes quando a última deveria ter valores de tensão mais elevados.

Investigações na literatura sugerem uma correção para o valor de tensão proporcional a taxa de deformação (4-1). Adotando o fator exponencial  $m = 0,016$ , temos os gráficos normalizados pela taxa de deformação:



**Figura 6.9: Curvas de tensão deformação ajustadas conforme normalização feita pela lei de potências.**

Como os resultados parecem ser coerentes, damos continuidade à análise numérica dos resultados.

**Tabela 6.3: Resumo dos valores numéricos obtidos experimentalmente. Valores sem normalização para a taxa de deformação.**

ID Ensaio	Altura do Corpo de Prova	Taxa Deformação	Deformação no escoamento	Tensão de Pico	Ponto de Densificação	Tensão de Platô
[-]	[mm]	[(mm/mm)/s]	[mm/mm]	[Mpa]	[mm/mm]	[MPa]
1	50	0,010	0,050	0,76	0,58	0,72
2	50	0,010	0,049	0,76	0,54	0,76
3	50	0,010	0,061	0,77	0,56	0,77
4	100	0,010	0,032	0,86	0,63	0,83
7	50	0,001	0,050	0,76	0,56	0,74
8	50	0,100	0,061	0,86	0,56	0,83
9	100	0,001	0,034	0,70	0,59	0,75
10	100	0,100	0,034	0,83	0,60	0,79

A análise da tabela mostra algumas das observações já feitas anteriormente. A deformação no ponto de escoamento, claramente diferente para os corpos com alturas diferentes, é uma delas.

Note também que a deformação no ponto de densificação também é diferente. Curiosamente, a região ótima para absorção de impacto, que é o trecho em que a tensão é constante,  $\varepsilon_d - \varepsilon_p$ , é maior nos ensaios com a peça de 100 mm.

Como já era de se esperar, há uma flutuação significativa nos valores de tensão de pico e de platô. A tabela 6.4 mostra uma análise estatística desses resultados. A partir desta tabela, é possível verificar que os ensaios 1 e 4 são possivelmente não representativos. Se considerarmos que a tensão normalizada deveria ser a mesma para todos os ensaios, e considerarmos os valores de média e desvio padrão encontrados para a tensão de platô, é possível verificar que os ensaios citados anteriormente têm desvio superior a 1,5 vezes o desvio padrão.

### 6.3 Conclusões dos resultados

Os experimentos de compressão uniaxial foram propostos inicialmente com o objetivo de melhor identificar as propriedades do material, para possibilitar a identificação de alguns parâmetros para o cálculo do atenuador de impacto segundo os modelos analíticos e da simulação numérica. Portanto, se faz necessário resumir as conclusões dos ensaios, e identificar as principais características observadas no processo.

Verificamos que na comparação entre corpos de prova com diferentes alturas, há uma sensível diferença entre a duração da região de platô para os corpos de prova com 1 ou 2 camadas. É razoável imaginar que um corpo com 3 ou mais camadas, esta região será pelo menos do mesmo tamanho que para duas camadas. Por outro lado, aproveitando todos os dados dos experimentos e adotando valores de corpos com menos camadas, estaremos no lado da segurança. Portanto, para efeito de cálculo do projeto, o ponto de densificação utilizado foi a média entre todos os ensaios.

**Tabela 6.4: Resumo dos valores de tensão normalizados, e análise estatística dos dados.**

ID Ensaio	Tensão de Pico			Tensão de Platô		
	Tensão Medida	Tensão Normalizada	Erro Estatístico	Tensão Medida	Tensão Normalizada	Erro Estatístico
	<b>[-]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[%]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[MPa]</b>	
1	0,76	0,73	5,9	0,72	0,70	6,5
2	-	-	-	0,76	0,74	1,4
3	-	-	-	0,77	0,75	0,1
4	0,86	0,83	6,1	0,83	0,80	7,3
7	0,76	0,76	2,2	0,74	0,74	1,4
8	0,86	0,80	2,7	0,83	0,77	3,1
9	-	-	-	0,75	0,75	0,3
10	0,83	0,77	0,7	0,79	0,73	1,5
Média	0,81	0,78		0,77	0,75	
Desvio Padrão	0,050	0,036		0,040	0,030	

\*Para a normalização foram utilizados como referência  $m = 0,016$  e  $\dot{\epsilon}_{ref} = 0,001$  (mm/mm)/s

Para estimar a tensão de pico, ignoramos os ensaios em que a tensão de pico foi igual ou menor que a tensão de platô. Isso pode ter ocorrido por diversos fatores, entre eles o fato de que, durante a fabricação, a utilização de elementos de fixação, como morsas, podem ter causado um esmagamento do corpo de prova e o material ter perdido a característica de pico. Como a ideia de estimar o pico é de prever o quanto a tensão do material pode ser subestimada, a presença desses valores na análise estatística pode prejudicar a previsão.

Com relação à tensão de platô, vamos utilizar simplesmente o a média dos valores normalizados pela lei de potências para fins de cálculo.

**Tabela 6.5: Resumo dos valores identificados durante experimentos e utilizados para fins de calculo.**

Tensão de Pico	0,78	[MPa]
Tensão de Platô	0,75	[MPa]
Ponto de Densificação	0,61	[mm/mm]

Para a realização da simulação em elementos finitos, faz se necessário uma curva de tensão por deformação plástica. Para isso, foi escolhida a curva do ensaio 7, por diversos motivos. Primeiro, é o ensaio que foi realizado com menor velocidade, e, portanto está menos sujeito a fatores dinâmicos. Segundo, pois as características de tensão de escoamento e tensão de platô são próximas da média, e conseqüentemente, ele é um ensaio representativo da amostra.

## 7 Simulação Computacional

Prática comum no dimensionamento de componentes de estruturas, as simulações por elementos finitos são utilizadas quando temos situações em que o cálculo analítico é muito trabalhoso, complicado ou em algumas vezes até mesmo inviável. Em cálculo estrutural, simulações FEA são utilizadas quando temos estruturas muito complexas, com muitos componentes e quando é necessária a avaliação de efeitos não lineares como grandes deformações, plasticidade, etc.

Na indústria automobilística, existem estudos computacionais para simular a colisão de veículos. Estes modelos são análises dinâmicas, que envolvem plasticidade de materiais metálicos, flambagem e comportamento pós-flambagem, degeneração de elementos em caso de fratura, além de propagação de ondas elasto-plásticas devido ao impacto. Neste tipo de simulação, usualmente são modelados os componentes estruturais do veículo, a carenagem, a dinâmica da suspensão e as inércias as inércias mais significativas do conjunto, como por exemplo o motor do carro. Em alguns casos, os bonecos de testes adotados em *crash-tests* também são modelados (como em (LTSC / NCAC Dummy Model Development) e (Overview of LSTC LS-DYNA (R) Anthropomorphic Models)). Quando isso ocorre, é também comum a modelagem dos cintos de segurança e do acionamento dos air-bags.

Para a aplicação do atenuador de impacto para o protótipo do Fórmula SAE, podemos simplificar o nosso modelo simulando apenas o dispositivo de absorção de energia, junto do quadro frontal. Assim, não é necessária a simulação de toda a estrutura, diminuindo o custo computacional.

### 7.1 Objetivos

A simulação em elementos finitos foi proposta para verificar os requisitos de absorção de energia exigidos pela regra. Portanto, devemos simular a situação que é prevista pela regra.

Em um segundo momentos foram realizadas simulações para repetir os resultados obtidos em experimentos estáticos e dinâmicos. Quando for relevante, estas situações são tratadas, e as diferenças em relação ao caso inicial da regra são discutidas.

O software de elementos finitos utilizado foi o *Abaqus 6.10*. Esta decisão foi tomada principalmente devido ao modelo constitutivo utilizado para modelar a espuma de PVC, o modelo “*CRUSHABLE FOAM*”, que é um dos modelos padrão do software e será discutido mais a frente.

## 7.2 Tipo de Solução

Como foi dito anteriormente, a simulação que deve ser realizada para validar o absorvedor de impacto é uma simulação do transiente durante a colisão do veículo. Para isso, iremos realizar uma rotina explícita.

Uma análise explícita em elementos finitos consiste em resolver o problema utilizando diferenças finitas para discretizar a variável tempo. A equação básica de uma análise explícita pode ser resumida em

$$M \frac{\partial^2 U(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} + K U(\mathbf{x}, t) = F(\mathbf{x}, t) \quad (7-1)$$

As discretizações realizadas em torno do tempo são baseadas em diferenças centradas. Conforme o manual do software (Dassault Systèmes, 2010), estas são computadas da seguinte forma:

$$\dot{U}_{i+\frac{1}{2}} = \dot{U}_{i-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_{i+1} - \Delta t_i}{2} \ddot{U}_i \quad (7-2)$$

$$U_{i+1} = U_i + \Delta t_{i+1} \dot{U}_{i+\frac{1}{2}} \quad (7-3)$$

Uma característica importante do método explícito é que ele é condicionalmente estável. Para garantir a estabilidade, é necessário garantir que o incremento de tempo seja inferior ao tempo em que é necessário para uma onda elástica atravessar o menor elemento do modelo. Resumidamente, devemos escolher:

$$\Delta t_{max} \leq l_{min} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (7-4)$$

O software de elementos finitos controla automaticamente o incremento de tempo, de forma que ele seja otimizado ao longo da integração da solução.

Outras configurações de estabilidade numérica do software como o “*bulk viscosity*” foram deixados nos valores padrão. Este parâmetro tem como objetivo

melhorar o desempenho da simulação, mas não apresenta modificações significativas ao resultado.

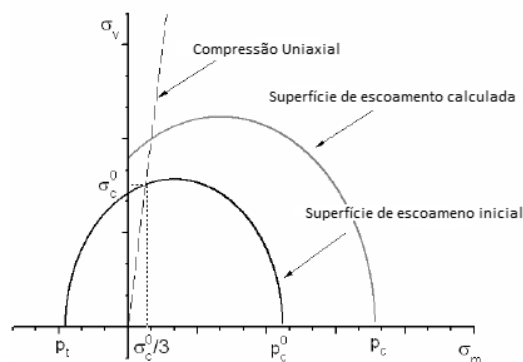
### 7.3 Modelo do Material

O projeto do atenuador de impacto é baseado nas propriedades do material escolhido, espuma de PVC. O material tem diversas propriedades não lineares, como foi descrito anteriormente. Logo, a escolha do modelo do material torna-se essencial para que a simulação tenha resultados coerentes.

Seguindo os resultados apresentados por (Tita, et al., 2012) para modelar espuma de PVC, foi utilizado o modelo “*CRUSHABLE FOAM*”, já implementado no *Abaqus*, próprio para materiais porosos com alta capacidade de absorção de energia. Os diferenciais do modelo constitutivo utilizado são o critério de escoamento e a característica do coeficiente de Poisson plástico virtualmente nulo.

O modelo constitutivo pode ser separado então em duas partes, a parte elástica e a parte plástica. A parte elástica é considerada como linear, semelhante à modelos para materiais metálicos. Portanto, para parametrizar o comportamento elástico são necessários o módulo de Young, coeficiente de Poisson e densidade.

Já a porção plástica é calculada a partir da curva de escoamento, que é calculada para prever o escoamento nas diferentes possíveis direções. Para parametrizar esta curva, são necessárias duas relações: a razão entre tensão de escoamento sob compressão e a tensão de escoamento sob pressão hidrostática ( $k_0$ ); e a razão entre a tensão de escoamento sob tensão hidrostática e a tensão de escoamento sob compressão hidrostática ( $k_t$ ).



**Figura 7.1: Gráfico para ilustrar o comportamento da curva de escoamento do material. Adaptado de (Tita, et al., 2012)**

Note que testes de tensão e compressão hidrostática são difíceis de serem realizados. Além disso, esses fatores influenciam pouco na simulação que desejamos realizar, pois o esforço que o corpo modelado em espuma de PVC sofrerá será compressivo unidirecional. Por este motivo, e também por questões de praticidade, vamos utilizar os mesmos parâmetros encontrados na literatura em (Tita, et al., 2012) no nosso modelo numérico.

Para o cálculo da tensão durante o regime plástico, o software faz um cálculo baseado em duas curvas com dados tabulares. A primeira curva é a de tensão por deformação logarítmica plástica. Esta curva representa o comportamento do material durante um caso quase-estático. A segunda curva é uma função de multiplicador de tensões em função da taxa de deformação. Esta última representa o aumento de rigidez do material conforme a velocidade de deformação aumenta. A tensão resultante é então dependente da deformação plástica e da taxa de deformação, e é calculada pela multiplicação das duas funções explicadas anteriormente.

Para simular o comportamento durante o regime plástico, foram utilizados os dados de um dos ensaios realizados nos testes quase-estáticos. A deformação logarítmica plástica foi calculada a partir do ponto de escoamento, descontando a deformação linear elástica:

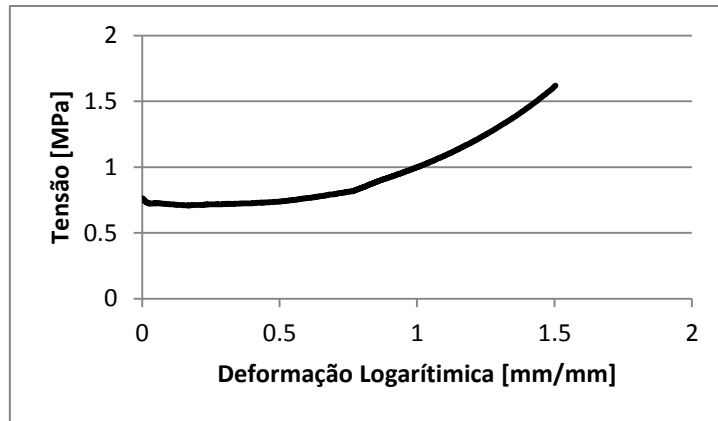
$$\varepsilon_{pl}(\varepsilon) = \begin{cases} 0 & , se \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \varepsilon - \varepsilon_{el}(\varepsilon) = \ln\left(1 - \frac{\Delta l}{L_0}\right) - \ln\left(1 - \frac{\sigma(\varepsilon)}{E}\right) & , se \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (7-5)$$

O gráfico da figura 7.2 abaixo ilustra os dados que foram utilizados no modelo.

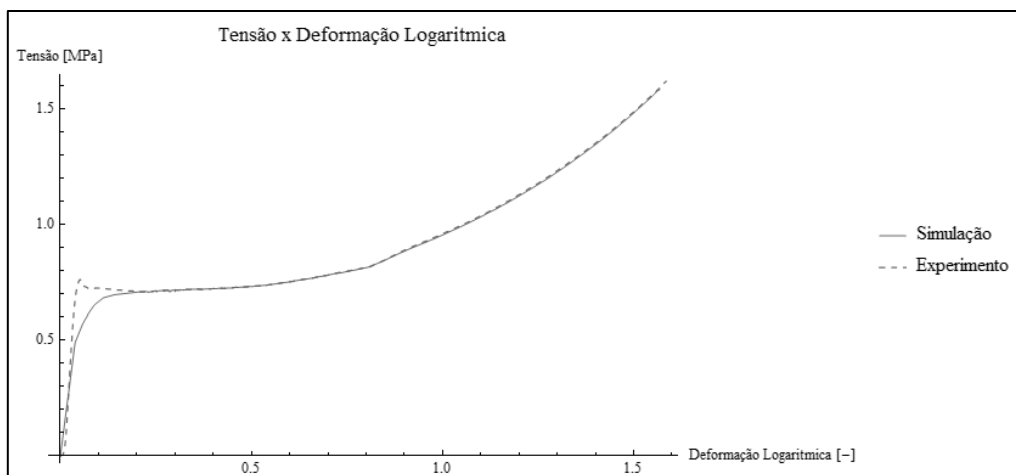
Para verificar o comportamento do modelo em regime plástico, foi feita uma simulação 2D simplificada, para repetir o ensaio de compressão quase-estática realizado. As figuras 7.2 e 7.3 mostram a comparação entre a simulação e o experimento em gráficos de tensão por deformação e força por deslocamento.

A análise dos resultados mostra que não foi possível simular o comportamento exato da espuma de PVC. O pico de tensão não é representado corretamente, resultando em uma perda na capacidade de absorção de energia do material. O mesmo problema aparece em (Tita, et al., 2012).





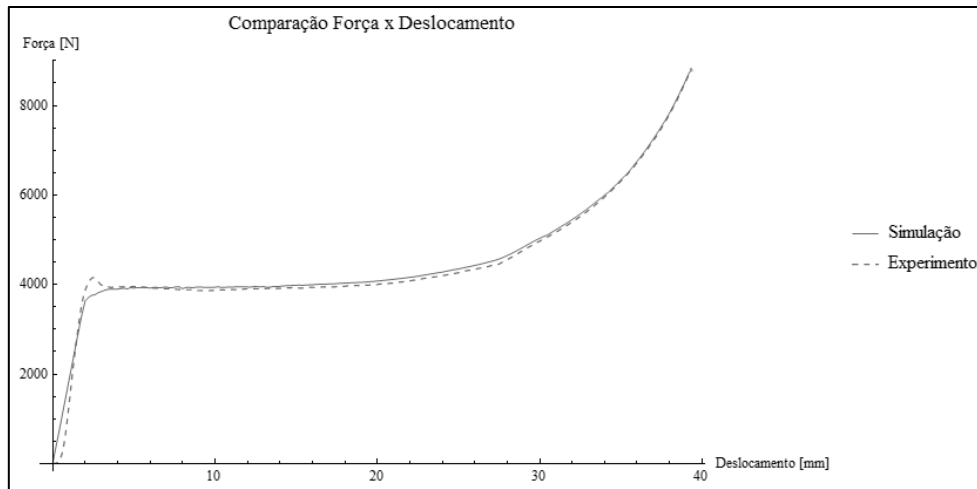
**Figura 7.2: Gráfico Tensão x Deformação Plástica Logarítmica utilizada para simular o comportamento da espuma de PVC.**



**Figura 7.3: Simulação dos resultados de tensão deformação do ensaio de compressão quase-estática.**

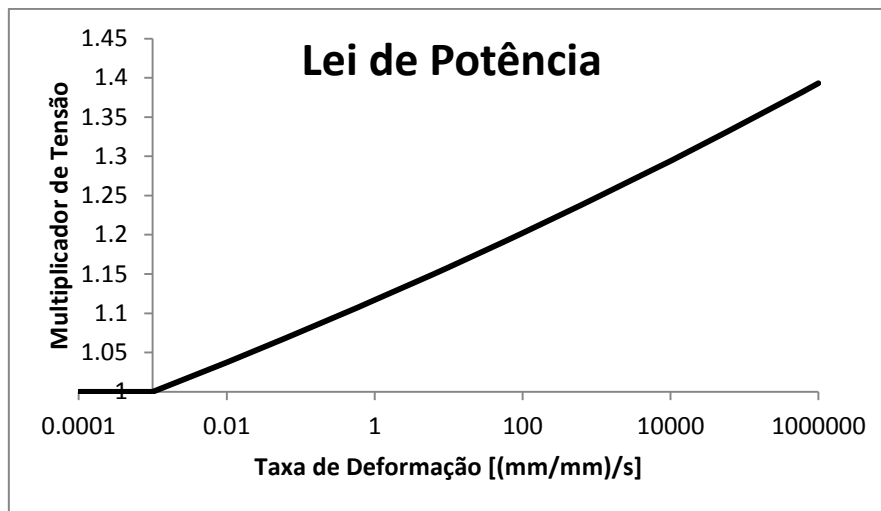
Mesmo não sendo possível corrigir este desvio, foi dada continuidade ao procedimento de simulação por dois motivos: o primeiro, pois o erro desvio é pequeno, é possível demonstrar que é da ordem de 3%. O segundo motivo é o fato da simulação ser mais conservadora ao prever absorção de impacto, em isso significa que um atenuador real tem capacidade ainda maior de absorção.

Para simular a influência da taxa de deformação no comportamento do material, foi utilizada a opção de aumento da tensão de escoamento em função da taxa de deformação. Para isso, foi gerada uma tabela com os pontos da função de potência descrita anteriormente na equação 4-1, utilizando valores encontrados em (Tagarielli, et al., 2008). A figura 7.5 ilustra o gráfico dos dados utilizados.



**Figura 7.4: Simulação dos resultados de força por deslocamento do ensaio de compressão quase-estática.**

Como não foi encontrado na literatura referências sobre o modelo com lei de potência em simulações com elementos finitos, serão realizadas duas simulações diferentes: uma em que o material não tem dependência com a taxa de deformação, e outro em que a opção de aumento de rigidez é considerada.



**Figura 7.5: Gráfico de aumento de tensão de escoamento.**

Os valores numéricos das outras propriedades utilizados na caracterização do material se encontram na tabela 7.1.

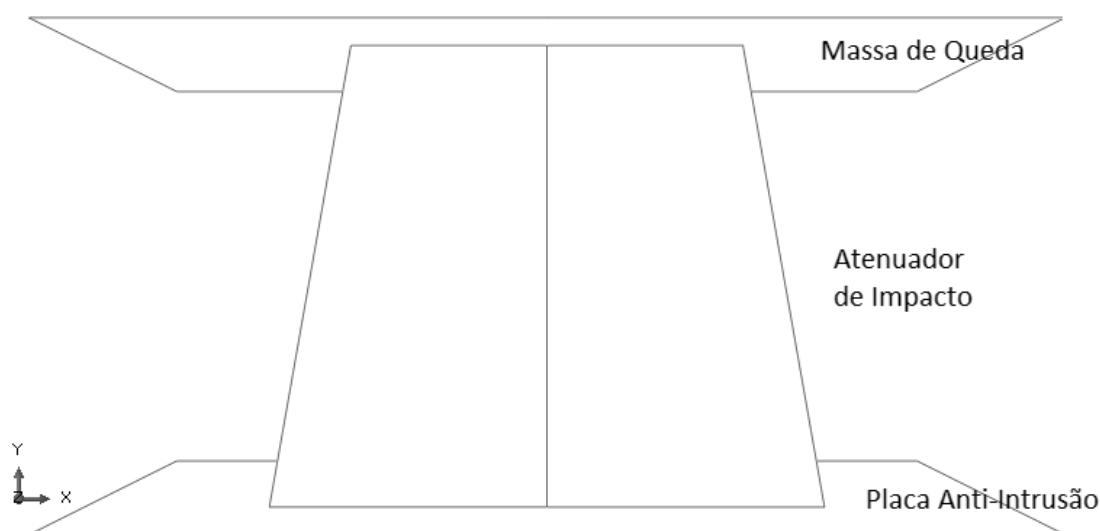
**Tabela 7.1: Propriedades do modelo constitutivo para a espuma de PVC.**

Densidade	60	kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	15,2	MPa
Coefficiente de Poisson	0,22	
Razão de compressão uniaxial e hidrostática	1,8852	
Razão de compressão e tensão	12,2965	

## 7.4 Geometria

Para simular a situação de colisão, devemos modelar pelo menos três peças: o atenuador de impacto, o peso de teste, e placa anti-intrusão. Repare que, dos três corpos, apenas nos interessa a deformação do atenuador, os outros dois podem ser modelados como corpos rígidos. Portanto, o atenuador de impacto foi modelado como um corpo sólido deformável, com a sua geometria exata de projeto, enquanto os outros dois foram simplificados por superfícies rígidas.

Apesar de uma simulação com a placa anti-intrusão deformável ser mais próxima da realidade, ela não é mais relevante que a primeira para a verificação da capacidade de absorção de energia do corpo do atenuador. A influência da placa é pequena no efeito global, e a contribuição é tornar todo o conjunto mais flexível, aumentando a capacidade de absorção de energia. Em outras palavras, se o corpo de espuma de PVC sozinho é capaz de absorver toda a energia necessária, então o conjunto da espuma com a placa tem desempenho ainda maior.



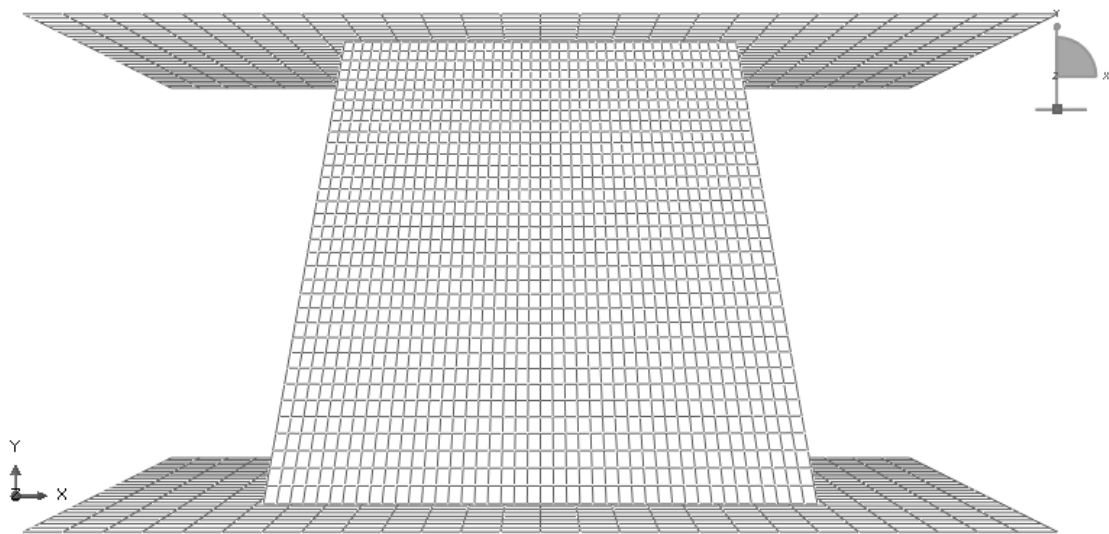
**Figura 7.6: Representação da geometria modelada no software de elementos finitos.**

## 7.5 Escolha da Malha

Para a malha, foram usados dois tipos de elemento. Para o corpo do atenuador de impacto, foi utilizado o elemento C3D8 (nomenclatura utilizada pelo software). Trata-se de um elemento sólido, do tipo bloco, com 8 nós e interpolação linear. O elemento linear foi escolhido seguindo a tendência das simulações encontradas na literatura, como em (Tita, et al., 2012). Além disso, o manual do software recomenda o uso de elementos de primeira ordem para simulações com grandes deformações. Por outro lado,

elementos tipo bloco foram escolhidos ao invés de elementos tetraédricos, pois a geometria simplificada do atenuador permite o uso desses elementos sem grandes distorções.

Para os corpos de queda e a barreira rígida, foram utilizados elementos de casca especiais para corpos rígidos, o R3D4. Trata-se de elementos de 4 nós. Quando se utiliza esse tipo de elemento, é necessário que o corpo tenha um ponto de referência, para o qual deve ser atribuir as devidas propriedades de inércia. Os elementos sólidos têm todos os seus graus de liberdade calculados a partir dos graus de liberdade do nó do ponto de referência.



**Figura 7.7: Representação da malha do modelo**

## 7.6 Condições Iniciais e de Contorno

As condições iniciais e de contorno são importantes para que a simulação numérica seja coerente com a realidade. Na maioria das vezes, tais condições são simplificações do caso real. Logo, se faz necessário identificar possíveis consequências de tais simplificações.

A simulação tem como objetivo identificar apenas o transiente durante o impacto. Portanto, para as condições iniciais, foi imposto a velocidade inicial de projeto a massa de teste, e todos os outros corpos em repouso.

Já as condições de contorno são um pouco mais complexas. A massa de queda é considerada como se estivesse em uma guia de tal forma que ela não pode girar, nem se deslocar horizontalmente. Em relação às coordenadas cartesianas representadas nas

figuras acima, a massa de queda tem deslocamento nulo imposto nas direções x e z, assim como rotação nula em torno dos 3 eixos. Repare que esta condição de contorno é relevante para a situação de verificação da capacidade de absorção de energia do atenuador de impacto, já que o deslocamento nas direções perpendiculares não nos interessa.

A placa anti-intrusão tem condições de contorno mais simples. Como estamos modelando-a como rígida, ela foi considerada simplesmente como engastada, logo não tem nenhum grau de liberdade. Esta condição simula bem o caso de um apoio rígido em um experimento de queda livre.

Outro aspecto importante é a interação entre os corpos. Pelo fato de a simulação ter múltiplos corpos, é necessário modelar conexões ou contatos. Neste caso em específico, foi modelado um contato global, onde a simulação prevê contato entre todos os pares de corpos, além de contato próprio, onde impede que uma superfície penetre nela mesma. Apesar de ser um custo computacional elevado, esta opção foi escolhida para evitar possíveis erros numéricos ocasionados pela falha em identificar quais os pares de superfícies podem entrar em contato. As propriedades do contato modelado estão resumidas na tabela abaixo.

**Tabela 7.2: Resumo das propriedades de contato**

Tipo de contato	<i>Global</i>
Comportamento Normal	<i>Sem penetração</i>
Comportamento Tangencial	<i>Atrito</i>
Coefficiente de atrito adotado	<i>0.02</i>

Além do contato global, a interação do atenuador de impacto com a placa anti-intrusão foi modelada como uma conexão do tipo “unida”, para simular o efeito do adesivo que cola a espuma à chapa de alumínio. Como o adesivo não sofre cisalhamento nem tração, e como também a espuma não sofre grandes deformações laterais, não se faz necessário uma análise da resistência dessa união.

## 7.7 Carregamentos

Na simulação desejada, os carregamentos modelados são somente os carregamentos inerciais. Foi atribuído ao corpo de queda o valor da massa relevante, em

kg. Propriedades de inércia de rotação não são relevantes, já que os seus respectivos graus de liberdade estão fixos.

Por outro lado, quando simulamos o caso do *droptest*, é necessário também acrescentar o efeito da gravidade. Esta é adicionada como uma força de corpo, atuando sobre todos os corpos.

## 7.8 Resultados

Vamos agora analisar alguns resultados da simulação do atenuador de impacto. Vamos começar analisando as simulações para o atenuador de impacto com as dimensões reais, e com velocidade e massa de impacto de acordo com as exigências de projeto.

Em uma segunda parte, vamos mostrar alguns resultados que serviram de comparação com os ensaios dinâmicos.

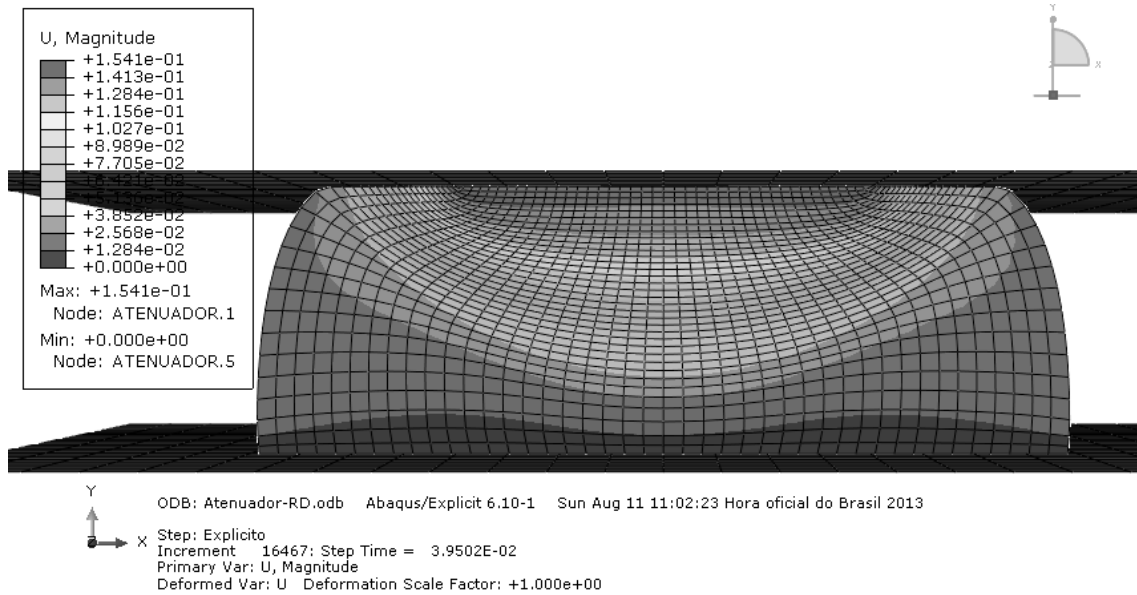
### 7.8.1 Atenuador de Impacto

Para a realização da simulação para o atenuador de impacto, foram levados em consideração todos os aspectos já citados anteriormente. Especialmente para o caso do projeto do atenuador, vamos mostrar os resultados para dois casos diferentes: um caso em que o material do atenuador foi modelado com aumento do limite de escoamento em função da taxa de deformação, e um caso em que o este efeito não é considerado. Para simplificar o texto, vamos nos referir a estes dois casos como “modelo RD” e “modelo simplificado”, respectivamente.

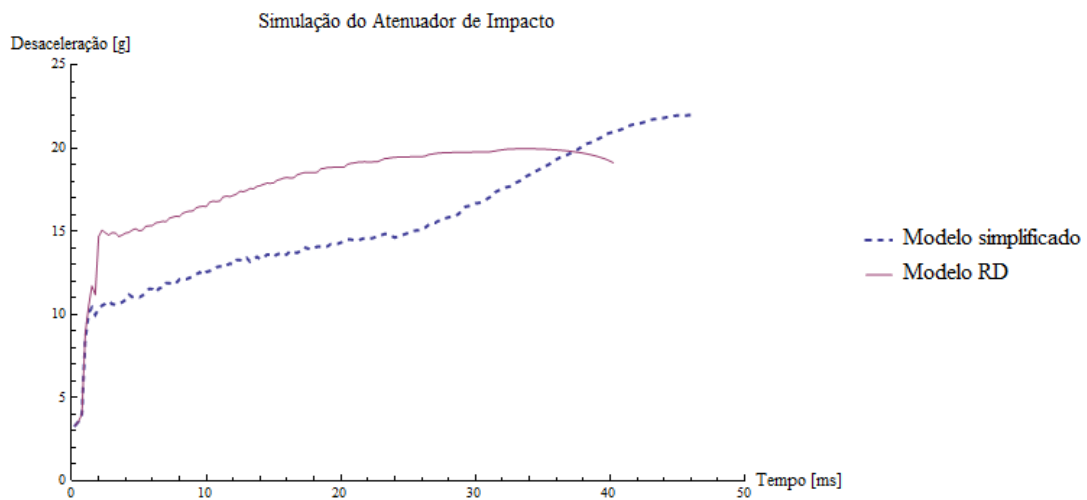
**Tabela 7.3: Resumo dos parâmetros da simulação do atenuador de impacto.**

Propriedades do atenuador de impacto		
Altura	250	[mm]
Largura na face inferior	300	[mm]
Inclinação das faces laterais	10	[graus]
Largura na face superior	194	[mm]
Profundidade	200	[mm]
Propriedades da massa de impacto		
Velocidade Inicial	7	[m/s]
Massa	300	[kg]

A figura 7.8 ilustra a deformada do atenuador de impacto. A forma da deformada do atenuador de impacto é coerente com imagens contidas na literatura, como em (Masso-Moreau, et al., 2003).

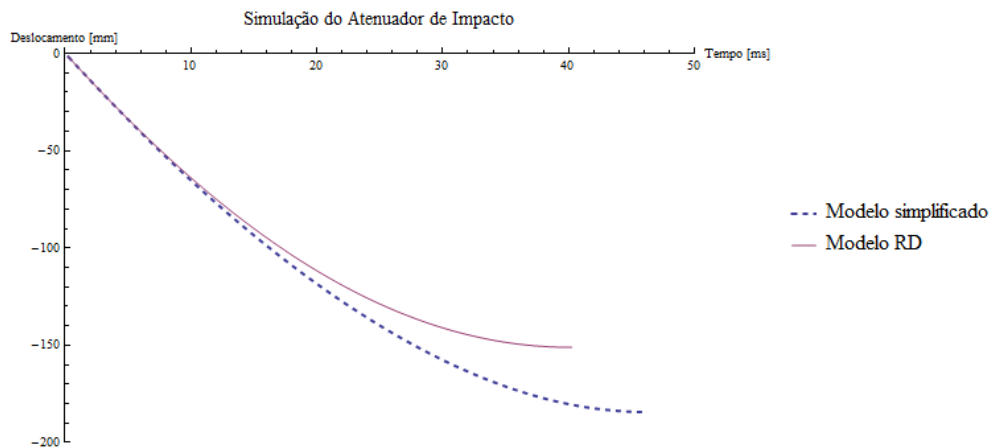


**Figura 7.8: Deformada para o instante quando a velocidade é nula. Caso com dependência da taxa de deformação.**



**Figura 7.9: Desaceleração calculada pela simulação durante o impacto.**

O gráfico de desaceleração mostra um comportamento coerente, de uma desaceleração crescente devido à seção transversal também crescente ao longo da deformação do atenuador.



**Figura 7.10: Evolução da deformação do atenuador de impacto.**

A comparação entre os dois modelos diferentes também apresenta bons resultados. Inicialmente, o modelo RD apresenta desaceleração maior devido ao aumento de rigidez pela alta taxa de deformação. Mas depois de certo ponto no impacto, o modelo simples tem desaceleração superior, pois a deformação ultrapassa o estágio de platô, e entrando no estágio de densificação do material. Esta última hipótese pode ser confirmada no gráfico da figura 7.10. O atenuador chega a deformar 184 mm, o que representa uma deformação de 0.73, 0.12 a mais do que o ponto de densificação verificado pelos testes quase-estáticos.

Com o tempo final do impacto, que pode ser observado em ambos os gráficos, é possível verificar que as desacelerações médias para o modelo simplificado e o modelo RD são respectivamente 15,4 g e 17,7 g. Portanto, os resultados indicam que o dimensionamento do atenuador de impacto está coerente.

### 7.8.2 Ensaios dinâmicos

Foram realizadas também diversas simulações para servir como comparação com os ensaios de queda livre. Para tal, algumas mudanças na geometria e nas condições de contorno foram alteradas. Foi também incluído o carregamento relativo à força da gravidade atuando tanto na massa de queda quanto no corpo de prova de espuma de PVC.

Outra medida que foi tomada para a realização dessas simulações foi simplificação do problema de 3D para 2D. Foi considerado estado plano de deformações para simplificar a realização da simulação para os diferentes casos, reduzindo o tempo computacional requerido.



## 8 Experimento de Queda Livre

Até este ponto, foram discutidas diversas propriedades do material, foram apresentados diferentes modelos, analíticos e dinâmicos. Entretanto, há pouco conteúdo na literatura para a correlação entre modelos e ensaios para o nosso caso em especial, que é espuma de PVC em ensaio dinâmico.

O modelo RPPL apresentou bons resultados em (Tan, et al., 2005), mas foi utilizado para espumas de alumínio, onde foi mostrado que o material não tem comportamento dependente da taxa de deformação. Em (Tita, et al., 2012), foi discutido o modelo computacional para a espuma de PVC e feito a comparação com um caso quase-estático. O mesmo modelo constitutivo do *Abaqus* foi utilizado e comparado com testes de impacto em (Masso-Moreau, et al., 2003), mas o material modelado foi espuma de poliestireno. A opção de enrijecimento da espuma em função da velocidade de deformação no modelo constitutivo não foi utilizado em nenhum dos artigos acima.

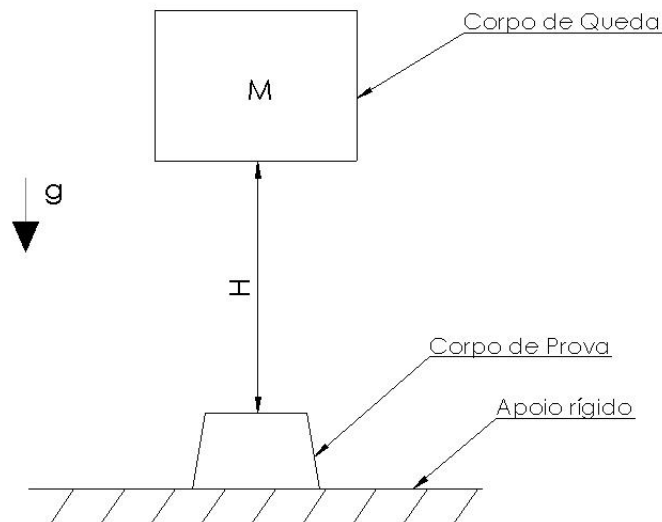
As incertezas dos modelos utilizados no projeto do atenuador do impacto motivaram a realização de um experimento dinâmico.

O experimento proposto neste trabalho é um experimento de queda livre, ou “*drop-test*”. O experimento consiste em deixar um objeto de massa conhecida cair em queda livre a partir de uma altura desejada em cima de um corpo de prova, que no caso será uma versão reduzida do atenuador de impacto. O corpo de prova estará apoiado em uma base rígida.

A altura é escolhida de tal forma que o corpo de queda atinja o corpo de prova com uma velocidade escolhida  $v_o$ . A expressão para a velocidade de impacto é calculada através da conservação de energia.

$$v_o = \sqrt{2gh} \quad (8-1)$$

O ensaio será devidamente instrumentado com acelerômetros e câmera filmadora de alta velocidade, para que seja avaliada a desaceleração da massa de queda durante o impacto. Assim, será possível comparar resultados dos modelos com o experimental a avaliar a validade dos mesmos no projeto do atenuador de impacto que será integrado ao veículo da equipe de Formula SAE.



**Figura 8.1: Desenho esquemático do experimento.**

## 8.1 Aparato Experimental

O experimento foi realizado dentro do Laboratório de Tecnologia Mecânica da UFRJ. O objeto utilizado como corpo de queda foi uma bigorna do laboratório. Foi projetado um sistema de cabos de aço para levantar a bigorna através de uma talha. Neste sistema é acoplado um mecanismo de soltura rápida, acionado manualmente por uma corda. O conjunto do corpo de queda pesa 79.2 kg.



**Figura 8.2: Imagem da massa de queda utilizada, em cima do apoio rígido.**

Para não danificar o chão do laboratório, a base da bigorna foi utilizada como apoio rígido. Foi também prevista proteções ao redor do apoio, caso a bigorna erre a base, ou tenha qualquer movimento diferente do previsto durante o impacto.

O aparato experimental está descrito com mais detalhes nos anexo .

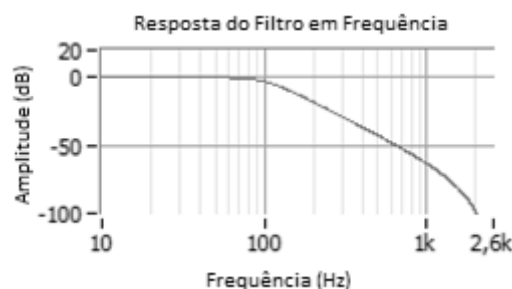
### 8.1.1 Acelerômetros

Para medir a aceleração durante o impacto, foi acoplado um acelerômetro à bigorna através de uma base magnética. Estes acelerômetros foram ligados a uma placa de aquisição de dados, e esta conectada a um computador portátil via USB. Especificações dos fabricantes dos equipamentos podem ser encontradas na tabela 8.1.

**Tabela 8.1: Resumo dos recursos utilizados para a realização das medições utilizando acelerômetro.**

Acelerômetros	
<b>Modelo</b>	353B03
<b>Fabricante</b>	<i>PCB Piezoelectronics</i>
<b>Sensibilidade Nominal</b>	10,40 mV/g
<b>Frequência nominal</b>	1~7000 Hz
<b>Aceleração máxima</b>	+/-500 g
Placa de aquisição de dados	
<b>Modelo</b>	NI 9234
<b>Chassis</b>	NI cDAQ-9174
<b>Fabricante</b>	<i>National Instruments</i>
Software de Aquisição de Dados	
<i>Labview Signal Express</i>	

O tratamento de dados dos acelerômetros foi feito de acordo com as recomendações da regra da Formula SAE. Foi calculada a desaceleração média a partir do sinal puro dos acelerômetros, e em seguida foi aplicado um filtro passa-baixa do tipo Butterworth, de terceira ordem e frequência de corte 100 Hz.



**Figura 8.3: Ilustração da resposta em frequência do filtro utilizado.**

A utilização do filtro é interessante, pois queremos avaliar apenas o transiente da bigorna, enquanto o acelerômetro captura vibrações de todo o conjunto. As chapas de aço que prendem os olhais à bigorna, por exemplo, vibram durante o impacto, mas não

estamos interessados no comportamento delas, e sim no comportamento global do conjunto.

Por simplificação, as especificações do filtro foram retiradas da regra. Não foi feita uma análise aprofundada na escolha do filtro, e, portanto, pode haver um filtro que é mais adequado para o problema em questão.

### **8.1.2 Filmadora de alta velocidade**

O ensaio será filmado com uma câmera de alta velocidade, com a finalidade de observar o comportamento do corpo de prova durante o impacto, assim como obter dados de posição, velocidade e desaceleração do corpo de queda.

A filmadora é controlada pelo software do próprio fabricante, o *HiSpec Control Software*. Logo, é necessária a utilização de um computador conectado à câmera através de uma placa ethernet.

A captura de imagens tem uma série de ajustes que influenciam na qualidade da imagem e na frequência de captura. Inclusive, quanto maior a frequência, menor é o tempo de abertura do obturador, significando que é necessário maior iluminação. Por isso, foram utilizados também dois holofotes profissionais para iluminar a área do ensaio que foi filmado.

A câmera pode filmar com uma resolução HD de 1280 x 1024 pixels em uma frequência de 506 fps, ou então pode filmar à uma frequência de 112.183 fps com uma resolução de 128x2 pixels (dados de (FASTEC IMAGING CORPORATION, 2012)).

Para a obtenção de uma estimativa da evolução da posição da bigorna durante o impacto, as imagens da câmera foram tratadas com o auxílio do módulo *Vision Assistant 2011* do *LabView*. Foi desenvolvida uma rotina para que o software identifique a massa de queda pelo alvo colado em dois pontos, e a partir de uma calibração da imagem, forneça quadro por quadro a posição do alvo em pixels convertida para milímetros.

Este método de tratamento de imagens foi baseado no trabalho apresentado por (Đuranna, et al.). O detalhamento do método passo a passo que foi utilizado neste trabalho está apresentado no anexo.

**Tabela 8.2: Resumo dos equipamentos utilizados para a realização da filmagem.**

Filmadora	
<b>Modelo</b>	<i>HiSpec 2 4G Color</i>
<b>Fabricante</b>	<i>Fastec Imaging</i>
<b>Resolução Máxima</b>	1240x1024 pixels
<b>Frequência máxima de captura</b>	112184 fps
Holofotes	
<b>Modelo</b>	<i>ViP Pro-L ight</i>
<b>Marca</b>	<i>Lowel Light Inc.</i>

## 8.2 Planejamento dos ensaios

Assim como foi feito para os experimentos de compressão, vamos propor diferentes experimentos para analisar a influência de algumas das propriedades do material. Todos os experimentos serão realizados com a mesma massa de queda, mas a altura de queda e a geometria dos corpos de prova sofreram pequenas modificações. A tabela 8.3 ilustra os ensaios realizados.

Os ensaios 1 e 2 são propostos para verificar se a altura do corpo de prova influencia no impacto. Além disso, foram propostos ensaios com diferentes alturas de queda para verificar a influência da velocidade inicial no impacto. Por fim, o corpo de prova do ensaio 4 possui geometria similar ao atenuador de impacto do projeto, pois tem as faces inclinadas em 10 graus.

Para nos aproximarmos da regra, os corpos de prova foram escolhidos para simular um caso reduzido do real, em que a energia do experimento é reduzida, mas queremos atingir os mesmos resultados de desaceleração média e máxima. Portanto, a seção transversal dos corpos de prova foi escolhida para obter desaceleração média próxima de 15 g. Em termos de energia, enquanto o atenuador real deve absorver 7350 J, os ensaios propostos envolvem 310 J (ensaios 1 e 2), e 699 J (ensaios 3 e 4), que correspondem respectivamente a 5% e 10% do problema original.

Os ensaios também foram planejados para ocorrerem aproximadamente na mesma faixa de taxa de deformação do que o projeto do atenuador de impacto em um teste real. Para um atenuador de 250 mm de comprimento e uma colisão a 7 m/s, a taxa de deformação inicial é de 28 mm/mm/s. O mesmo ocorre para um atenuador de 100 mm a 2,8 m/s, e 150 mm a 4,2 m/s. Portanto, os ensaios 1, 3 e 4 têm taxa de deformação

inicial equivalentes ao caso da regra. Já o ensaio 2 tem taxa de deformação inicial de 18,7 mm/mm/s.

**Tabela 8.3: Resumo dos parâmetros dos ensaios**

ID	<i>Corpo de Prova</i>			<i>Massa de Queda</i>			Taxa de
	Largura [mm]	Profundidade [mm]	Altura [mm]	Massa [Kg]	Altura da Queda [m]	Velocidade de Queda [m/s]	Deformação Inicial [mm/mm/s]
1	110	110	100	72	0.4	2.8	28
2	110	110	150	72	0.4	2.8	18,7
3	110	110	150	72	0.9	4.2	28
4	110*	160	150	72	0.9	4.2	28

\* O corpo de prova 4 possui faces laterais com inclinação de 10 graus.

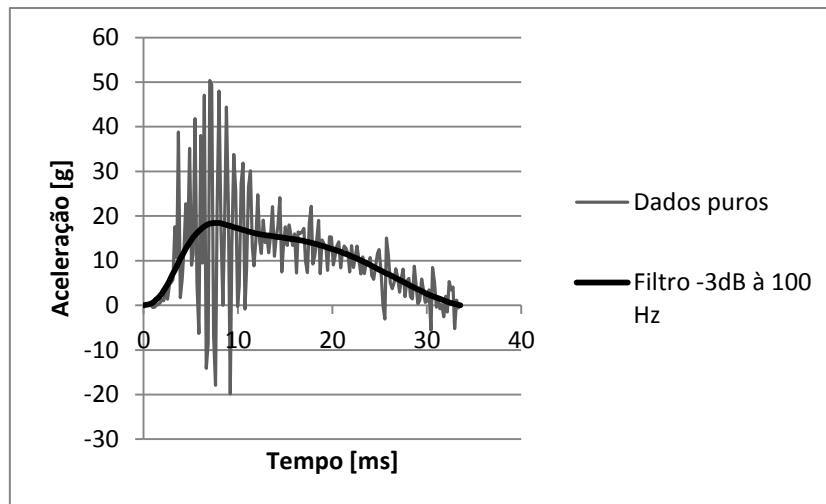
Os acelerômetros foram ajustados para uma frequência de aquisição de dados de 6 kHz. A câmera de alta velocidade foi ajustada para filmar 492x412 pixels com taxa de 2598 fps nos ensaios 1 e 2, nos demais ensaios o ajuste foi de 464x366 pixels, com taxa de 3000 fps.

### 8.3 Resultados

Vamos primeiro analisar todos os dados obtidos para o ensaio 1, e em seguida vamos apresentar os resultados de forma reduzida os resultados mais relevantes dos outros ensaios.

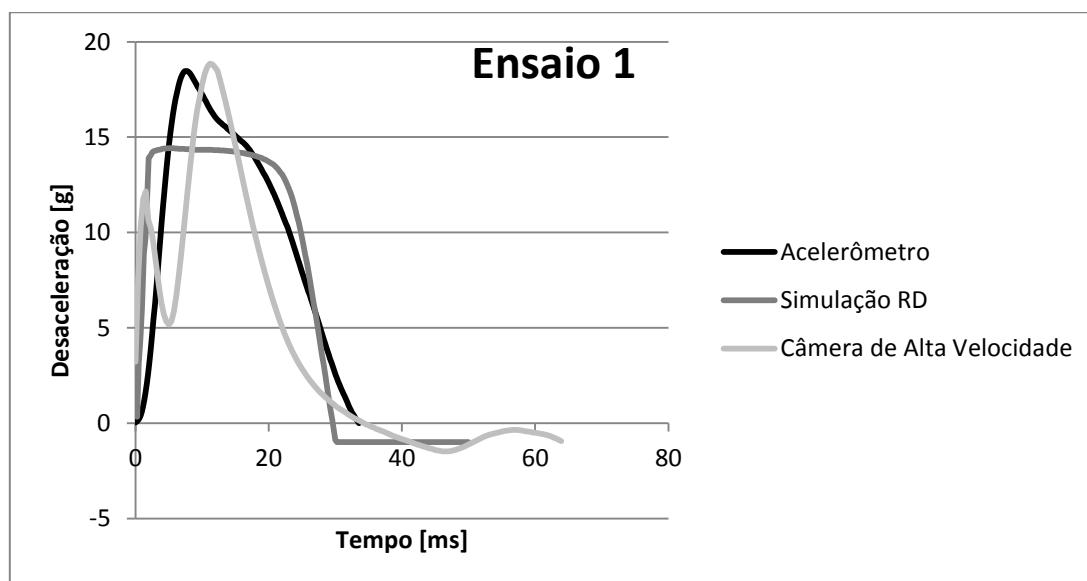
Primeiro, repare o efeito da aplicação do filtro nos dados do acelerômetro, na Figura 8.4. A curva de desaceleração após a aplicação do filtro é mais fácil de ser compreendida, e, portanto, será utilizada na apresentação dos resultados deste ponto em diante.

Outra observação é que, a partir da curva de deslocamento obtida pela câmera, é possível derivar a velocidade e a aceleração. Entretanto, por se tratar de um sinal digital, as derivadas apresentam ruído de alta frequência bastante significativo relacionado à precisão na determinação da posição do alvo. Portanto, também foi aplicado um filtro passa-baixa no sinal.



**Figura 8.4: Efeito da aplicação do filtro passa-baixa nos dados obtidos pelo acelerômetro.**

Agora, vamos comparar os resultados obtidos para a aceleração tanto com os acelerômetros quanto com o tratamento das imagens obtidas com a câmera de alta velocidade, com a simulação realizada em elementos finitos. Todas as curvas estão representadas na figura 8.5.



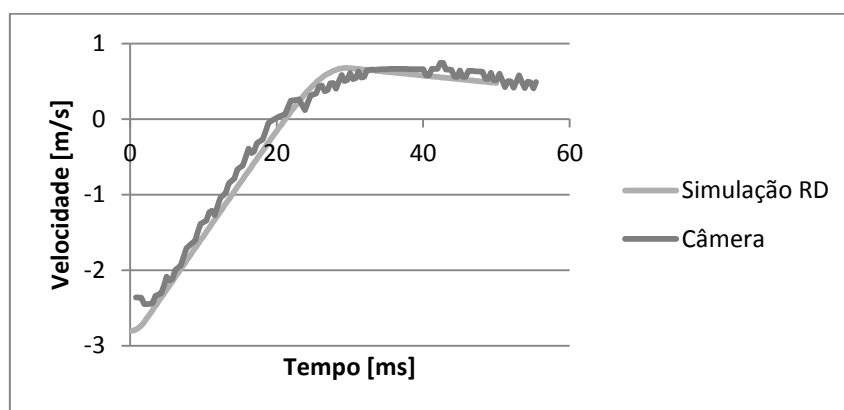
**Figura 8.5: Comparativo de resultados para a desaceleração da massa de queda durante o impacto.**

Uma primeira análise dos resultados mostrou que a simulação RD (material com comportamento dependendo da taxa de deformação) é mais coerente com os sinais das medições realizadas nos experimentos. Portanto, por simplificação, apresentamos apenas os resultados do primeiro experimento.

Se compararmos as curvas da simulação, do acelerômetro e da câmera lenta, elas apresentam aproximadamente o mesmo comportamento, apesar de algumas ressalvas. A primeira, e talvez mais importante, é que a simulação não é capaz de prever o pico de desaceleração medido pelo acelerômetro e pela câmera. Isso se deve principalmente ao erro observado anteriormente, na seção de modelagem do material na simulação, na figura 7.4. Para este primeiro caso, o erro entre desacelerações máximas foi de 20%. Por outro lado, o erro nos valores de desaceleração média é inferior: 12%. Estes dados são importantes, pois são os primeiros indícios de que o método da simulação numérica é um método válido.

A curva de desaceleração obtida pelas imagens da câmera não se mostrou adequada para tirar conclusões críticas do fenômeno. Por outro lado, as imagens ajudam a compreender o fenômeno. É possível encontrar no anexo XXX as imagens da câmera imediatamente antes do começo do contato e no instante de máxima deformação do corpo de prova, assim como a ilustração da deformada da simulação para todos os ensaios realizados.

Para ilustrar os dados obtidos a partir das imagens da câmera, apresentamos os gráficos de velocidade e de posição da massa de queda nas figuras a seguir.



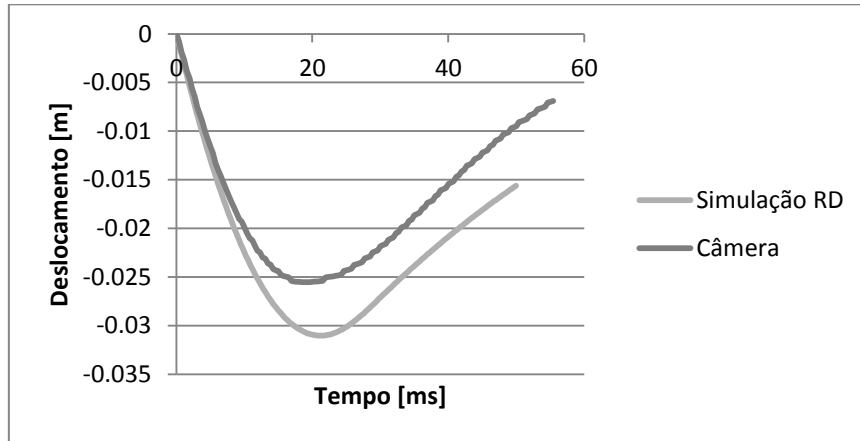
**Figura 8.6: Evolução da velocidade da massa de queda durante o impacto.**

Na Figura 8.6 é possível reparar que a curva de velocidade da simulação e da câmera de alta velocidade são coerentes. Este é mais um indicativo que a simulação é válida.

Já a figura 8.7 mostra o deslocamento medido pela câmera e o simulado. Ambas as curvas tem aspecto semelhante, apesar de os valores máximos serem significativamente diferentes. Isso pode ter ocorrido devido ao fato que, conforme foi



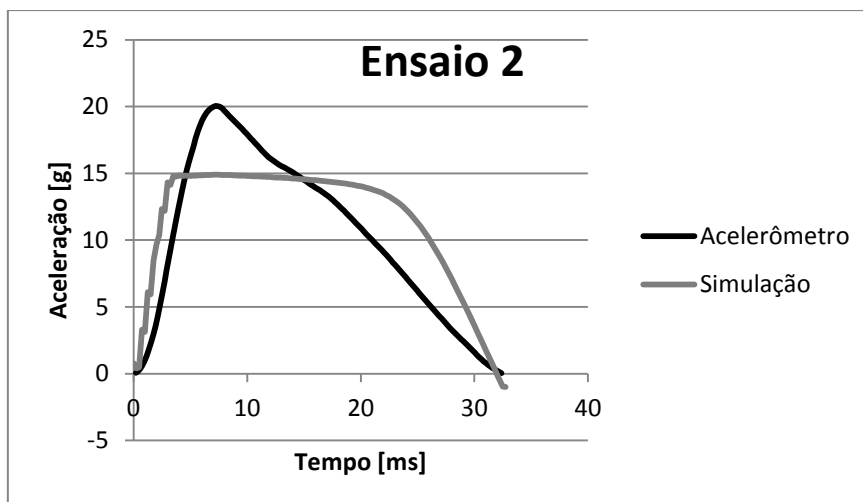
visto anteriormente, a desaceleração experimentada é maior que a simulada, e, portanto a massa se deslocou menos até o repouso. Outra explicação seria um possível erro na calibragem da medição realizada pela câmera.



**Figura 8.7: Evolução do deslocamento do corpo de prova durante o impacto.**

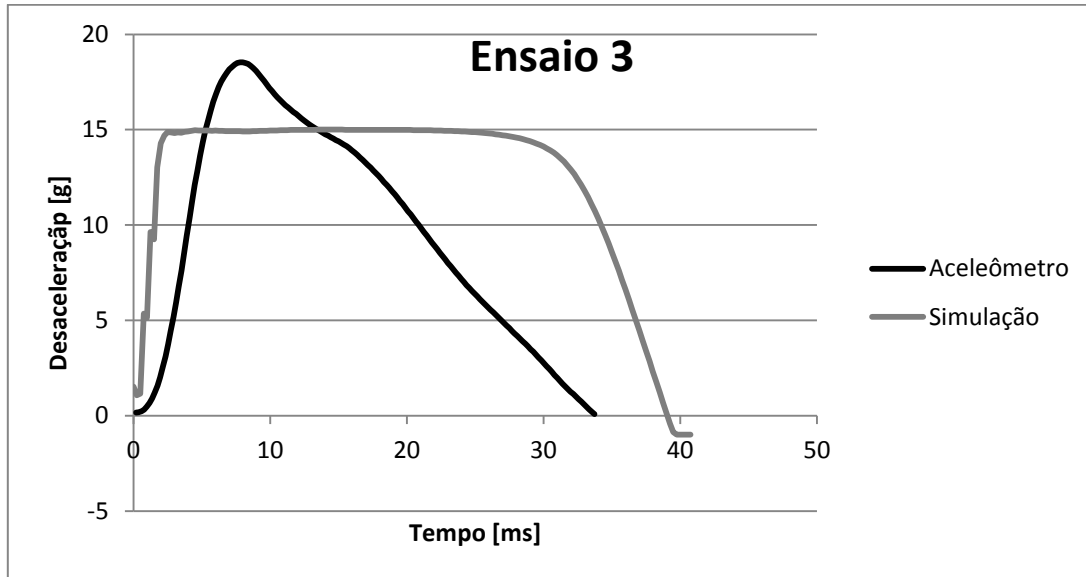
Visto as limitações do método de tratamento de imagem, as curvas obtidas por esse método não serão apresentadas para nos demais ensaios. Os dados da câmera serão utilizados apenas para efeitos ilustrativos, e cálculo da desaceleração média (através dos quadros de início do impacto e de máxima deformação).

O ensaio 2 é semelhante ao primeiro, exceto pelo fato de que o corpo de prova ter uma camada adicional de espuma. É possível observar comportamento semelhante ao primeiro ensaio: acelerômetros medindo pico superior ao simulado, mas as acelerações médias são coerentes.



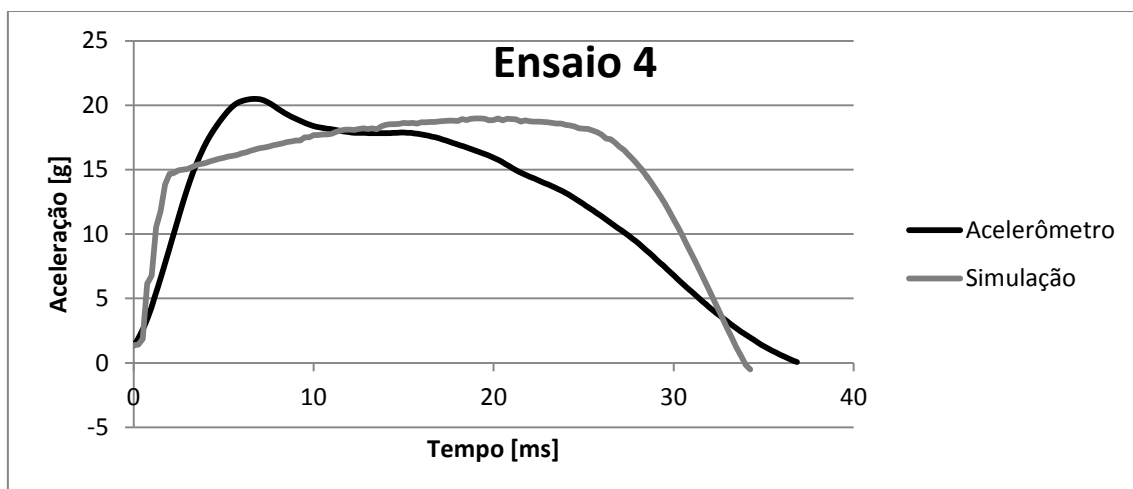
**Figura 8.8: Desaceleração durante o impacto do ensaio 2.**

Já o ensaio 3 não foi bem sucedido devido ao mal posicionamento da massa de queda antes do acionamento do mecanismo de soltura rápida. Mesmo assim, apresentamos uma comparação gráfica das desacelerações. A simulação foi modificada para a área efetiva ser igual à área deformada durante o teste. Valores médios de desaceleração do ensaio 3 não são mostrados pois não se mostraram coerentes.



**Figura 8.9: Desaceleração durante o impacto do ensaio 3.**

O ensaio 4 é talvez o mais importante, pois o corpo de prova tem geometria trapezoidal, semelhante ao projeto do atenuador de impacto. A comparação entre acelerômetro e simulação são ligeiramente diferentes. O ensaio 4 é o único em que a desaceleração na simulação chega a ser superior após o pico.



**Figura 8.10: Desaceleração durante o impacto do ensaio 4**

A primeira observação que deve se tirar é que o método da câmera de alta velocidade se mostrou incoerente com os outros métodos de medição. Isto está relacionado ao fato de que a precisão dos dados está relacionada a uma inspeção manual das imagens, além de estar também relacionada ao número de pixels reduzido para alta taxa de quadros por segundo. É possível verificar que errar o cálculo da desaceleração em um quadro implica em errar até 0,5 g na estimativa da desaceleração média, e ao mesmo tempo.

**Tabela 8.4: Resumo das desacelerações médias até o repouso da massa de queda (velocidade nula)**

Desaceleração até o repouso [g]			
Método	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 4
Simulação	13,4	13,4	16,8
Acelerômetros*	13,2	13,6	14,7
Câmera de Alta Velocidade	15,1	17,6	20,6

Por outro lado, se levarmos em consideração apenas os dados de simulação e acelerômetros, vemos que os resultados são bem interessantes. O desvio maior ocorreu no último ensaio, com o erro de 15%.

Quando analisamos a aceleração até a perda de contato, (em termos práticos, até a aceleração voltar a ser igual a da gravidade), observamos que os dados são mais uma vez coerentes. A tabela 8.5 resume os valores obtidos, e o desvio máximo foi novamente no ensaio 4, com erro de 21%.

**Tabela 8.5: Resumo das desacelerações médias até a perda de contato da massa de queda com o corpo de prova.**

Desaceleração até a perda de contato [g]			
Método	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 4
Simulação	11,7	11,4	14,7
Acelerômetros	10,3	10,3	12,1
Câmera de Alta Velocidade	-	-	-

Não foi apresentado resultados para a câmera, pois a identificação do quadro onde o contato é perdido mostrou se ambígua na medida em que sombras e outras características impossibilitam o processo de forma precisa.

## 8.4 Conclusões

Os experimentos dinâmicos foram propostos para a verificação do método de simulação computacional, em relação ao projeto de um atenuador de impacto. Os experimentos foram conduzidos e instrumentados com acelerômetros e câmera de alta velocidade.

Os resultados obtidos com o acelerômetro mostraram que, apesar de as simulações não serem capazes de identificar o pico de desaceleração no início do impacto, as desacelerações médias são coerentes, tornando o método válido. Os picos não ultrapassam o valor máximo de 40 g, mas influenciam no valor médio de desaceleração. Entretanto, deve-se levar em conta o erro encontrado de 21% na realização do projeto. Logo, é de boa prática adotar um valor para projeto pelo menos 25% inferior. No caso do atenuador de impacto para o Formula SAE, o projeto deve prever desaceleração média de no máximo 15 g, ao invés de 20 g conforme citado na regra.

Os resultados da câmera, em termos quantitativos, não se mostraram relevantes na verificação dos requisitos de projeto do atenuador. Por outro lado, as imagens ajudam a observar algumas características da deformada da espuma de PVC, que podem auxiliar na validação das simulações.

## 9 Conclusões

Como foi apresentado no início do texto, este trabalho teve como objetivo inicial o projeto de um atenuador de impacto adequado para a equipe de Formula SAE da UFRJ, mas que para atingir o objetivo, teve o esforço de caracterizar o comportamento das espumas de PVC para chegar a uma metodologia de projeto válida para o objetivo principal.

Uma análise preliminar dos materiais absorvedores de impacto disponíveis mostrou que a espuma de PVC seria uma boa opção para o projeto do atenuador de impacto. Entretanto, apesar de diversos textos na literatura sobre espumas poliméricas e espumas de PVC, não foi encontrado nenhum método claro e preciso para absorvedores de impacto para o material em questão. Modelos analíticos se mostraram inadequados, pois não levam em consideração o efeito visco-elástico do PVC. Como alternativa, foi proposto uma simulação numérica utilizando o software comercial, que contém um modelo constitutivo simplificado, mas adequado para o problema em questão.

Em um primeiro instante, foi proposto experimentos quase-estáticos para identificar com precisão alguns parâmetros do material. Em um segundo momento, a calibragem da simulação foi testada com os resultados dos testes quase-estáticos. Nesta etapa, já foi identificado uma fragilidade na simulação devido à incapacidade de representar o pico de tensão presente no começo do regime plástico do material. Porém, o modelo não foi desconsiderado por representar um erro pequeno na estimativa global de absorção de energia.

Dando continuidade ao trabalho, após análise dos resultados dos ensaios quase-estáticos, foi proposto um teste de impacto, em escala reduzida, para avaliar a acurácia da simulação com aquilo que observamos experimentalmente. A análise comparativa dos resultados numéricos e os sinais obtidos por acelerômetro são coerentes, apesar de apresentar desvios significativos entre eles. Foi observado que o pico de desaceleração durante o impacto foi subestimado. Um dos motivos mais prováveis é a incapacidade vista na simulação quase-estática de simular o pico de tensão discutida anteriormente. Outro erro provável é a falha em modelar a contribuição do efeito da taxa de deformação na rigidez do material.

Como conclusão, podemos dizer que os resultados mostraram que as simulações realizadas são válidas, desde que o projetista adote certos cuidados. Os resultados mostraram que é adequada a utilização de um fator de segurança na desaceleração média de projeto.

Para futuros trabalhos com espuma de PVC, torna-se interessante a realização de experimentos do tipo Split-Hopkinson Pressure Bar para a obtenção de curvas em alta taxa de deformação. Assim, o efeito visco-elástico pode ser mais bem compreendido, e também melhor modelado na simulação.

Voltando ao projeto do atenuador de impacto, o atingimento do objetivo é uma questão relativa. Foi apresentada uma geometria, que de acordo com as simulações, é capaz de atender as especificações exigidas pela competição de Formula SAE. Entretanto, não foi realizado um experimento com um corpo de prova em dimensões reais para verificação. Além disso, se assumirmos o desvio entre os resultados da simulação e os resultados obtidos experimentalmente como erro, o dimensionamento apresentado neste trabalho não apresenta a faixa de segurança de 15 g de desaceleração.

Como modificações da geometria do atenuador para atingir a nova meta de desaceleração, podemos propor ao menos duas opções. A primeira seria a diminuição da seção transversal do corpo, para diminuir a força de resistência do atenuador, e conseqüentemente, a desaceleração média. Entretanto, cabe ressaltar que, devido as relações derivadas do comprimento de deformação, se o atenuador de 250 mm de altura sofrer desaceleração média de 15 g ele entrará obrigatoriamente em regime de densificação. Apesar de parametrizado na simulação, o comportamento de densificação não foi verificado nos ensaios dinâmicos, adicionando assim ao projeto mais dúvidas em relação a validade do mesmo.

Outra alternativa seria projetar um atenuador com altura inicial maior, mas com um pré-esmagamento, assim como é feito em estruturas de *honeycomb* de alumínio, mostrado na figura 2.4. Assim, eliminaríamos o efeito do pico de tensão da simulação, teríamos uma faixa de platô maior e ainda estaríamos um pouco mais perto da realidade.

Por fim, com relação ao teste em escala real, os parâmetros necessários (300 kg a 2,5 m de altura) tornam o ensaio inviável dentro da estrutura do laboratório devido a questões de segurança. Alternativamente, pode-se provar a capacidade de absorção de

energia da espuma de PVC através de um ensaio quase-estático, apesar deste ensaio não representar o comportamento do material sob impacto.

Independente de o texto atingir seus objetivos iniciais, o leitor tem acesso a diversas informações e resultados que podem servir de referência para futuros trabalhos relacionados ao impacto, modelagem da espuma de PVC e de espumas poliméricas em geral. As filmagens realizadas com a câmera de alta velocidade serviram de experiência para trabalhos futuros, e o método de tratamento de imagem apresentado que permite obtenção de informação sobre a geometria das peças filmadas pode dar início a uma série de outros estudos dentro dos laboratórios da universidade.

## 10 Bibliografia

**Ashby, M.F., et al. 200.** *Metal Foams: A Design Guide*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 200.

**Avilés, M. e Aguilar-Montero, A. 2010.** Mechanical degradation of foam-cored sandwich materials exposed to high moisture. *Composite Structures*. 2010, pp. 122-129.

**Calladine, C.R. e English, R.W. 1984.** Strain-rate and inertia effects in the collapse of two types of energy-absorbing structure. *International journal of Mechanical Sciences*. 1984, pp. 689-701.

**Chen, Weinong W. e Song, Bo. 2010.** Dynamic Characterization of Soft Materials. [A. do livro] Arun Shukla, Guruswami Ravichandran e Yapa D.S. Rajapakse. *Dynamic Failure of Materials and Structures*. Nova Iorque : Springer Science+Business Media, 2010, pp. 1-28.

**Coastal Automotive. 2011.** IMPAXX Polystyrene Foam. *Coastal Automotive*. [Online] 2011. [Citado em: 05 de 30 de 2013.] <http://www.coastal-automotive.com/products/impaxx>.

**Daniel, Isaac M. 2010.** Impact Response and Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures. [A. do livro] Arun Shukla, Guruswami Ravichandran e Yapa D.S. Rajapakse. *Dynamic Failure of Materials and Structures*. Nova Iorque : Springer Science+Business Media, 2010, pp. 191-233.

**Dassault Systèmes. 2010.** Abaqus Theory Manual. 2010.

**Deshpande, V.S. e Fleck, N.A. 2000.** Isotropic constitutive models for metallic foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 48. 2000, pp. 1253-1283.

**DIAB Group AB. 2010.** Divinycell H Technical Manual . *Nothern Composites*. [Online] Outubro de 2010. [Citado em: 02 de Junho de 2013.] [http://www.nfgsales.com/files/active/1/Divinycell\\_H\\_manual.pdf](http://www.nfgsales.com/files/active/1/Divinycell_H_manual.pdf).

**Diab Group. 2012.** Divinycel® H Technical Data. *Diab Global Portal*. [Online] Outubro de 2012. [Citado em: 27 de Março de 2013.] <http://www.diabgroup.com/~media/Files/Products/Core-material-pdf/H%20Oct%202012%20rev9%20SI.pdf>.



Divinycell H HP. *DIAB Global Portal*. [Online] [Citado em: 30 de 05 de 2013.] <http://www.diabgroup.com/en-GB/Products-and-services/Core-Material/Divinycell-H-HP>.

**Đuranna, Richard, Tolnay, Marián e Slamka, Ján.** Optical Analysis of an Impact Attenuator Deformation.

**EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio LTDA. 2007.** Produtos>Máquinas de Ensaio>Linha DL. *EMIC - Mais que uma simples máquina, uma parceria*. [Online] 2007. [Citado em: 7 de Agosto de 2013.] <http://www.emic.com.br/index.php?c=110&s=297&lang=16>.

**FASTEC IMAGING CORPORATION. 2012.** Camera Record Table. *High Speed Digital Video Camera, High Speed Scientific Camera - HiSpec 2*. [Online] 2012. [Citado em: 11 de Agosto de 2013.] <http://www.fastecimaging.com/products/high-speed-cameras/tethered-cameras/hispec-2>.

**Gdoutos, E.E., Daniel, I.M. e Wang, K.-A. 2002.** Failure of cellular foams under multiaxial loading. *Composites: Part A*. 2002, pp. 163-176.

**Gibson, Lorna J. e Ashby, Michael F. 1999.** *Cellular Solids - Structure and properties - Second edition*. s.l. : Cambridge University Press, 1999.

**Gong, L. e Kyriakides, S. 2005.** Compressive response of open cell foams Part II: Initiation and evolution of crushing. *International Journal of Solids and Structures*. 18 de Setembro de 2005, pp. 1381-1399.

**Hexcell. 1999.** HexWeb Honeycomb Attributes and Properties. *Hexcell*. [Online] 1999. [Citado em: 30 de 05 de 2013.] [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf).

—. **2005.** HexWeb® Honeycomb Energy Absorption Systems - Design Data. *Hexcell*. [Online] 03 de 2005. [Citado em: 30 de 05 de 2013.] [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Energy\\_Absorption\\_Systems.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Energy_Absorption_Systems.pdf).

*LTSC / NCAC Dummy Model Development. Mohan, Pradeep, et al.* 11th International LS-DYNA(R) Users Conference. pp. 53-64.

**Luong, Dung D., Pinisetty, Dinesh e Gupta, Nikhil. 2013.** Compressive properties of closed-cell polyvinyl chloride foams at low and high strain rates: Experimental investigation and critical review of state of the art. 2013, pp. 403-416.

**Maiti, S. K., Gibson, L. J. e Ashby, M. F. 1984.** Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids. *Acta Metallurgica*. Novembro de 1984, pp. 1963-1975.

**Masso-Moreau, Y. e Mills, N. J. 2003.** Impact compression of polystyrene foam pyramids. *International Journal of Impact Engineering* 28. 2003, pp. 653-676.

**Metacorp Nanostructures. 2006.** Technical Overview. *Metacomb Nanostructures*. [Online] 2006. [Citado em: 30 de 05 de 2013.] <http://www.metcomb.com/products.html>.

**Nakazawa, Yoshiaki, et al. 2005.** Development of Crashbox for Passenger Car with High Capability for Energy Absorption. *VIII International Conference on Computational Plasticity*. 2005, pp. 1-4.

*Overview of LSTC LS-DYNA (R) Anthropomorphic Models. Marauth, Cristoph, et al.* 11th International LS-DYNA (R) Users Conference. pp. 41-52.

**Patschike, et al. 2013.** *US 2013/0057000* Estados Unidos, 2013.

**Plascore. 2013.** Advanced European Mobile Deformable Barrier for Side Impact Crashworthiness Evaluation. *Plascore*. [Online] 2013. [Citado em: 03 de 05 de 2013.] [http://www.plascore.com/pdf/Plascore\\_AE-MDB\\_Barrier.pdf](http://www.plascore.com/pdf/Plascore_AE-MDB_Barrier.pdf).

—. **2013.** <http://www.plascore.com/>. *Plascore*. [Online] 2013. [Citado em: 03 de 05 de 2013.] [http://www.plascore.com/pdf/Plascore\\_NHTSA\\_Barrier.pdf](http://www.plascore.com/pdf/Plascore_NHTSA_Barrier.pdf).

—. **2012.** Plascore Crushlite. *Plascore*. [Online] 2012. [Citado em: 03 de 05 de 2013.] [http://www.plascore.com/pdf/Plascore\\_CrushLite.pdf](http://www.plascore.com/pdf/Plascore_CrushLite.pdf).

*Productivity Gain in Crashworthiness Simulation EASi-CRASH for Complete Safety and Crash Modelling for LS-DYNA. Shetty, Shivakumar e Sahlin, Peter.* 5th European LS-DYNA Users Conference.

- Radford, D.D., Desphande, V.S. e Fleck, N.A. 2005.** The use of metal foam projectiles to simulate shock loading. *International Impact Engineering*, 30. 2005, pp. 1152-1171.
- Reid, S. R. e Peng, C. 19987.** Dynamic uniaxial crushing of wood. *International Journal of Impact Engineering*. 19987, pp. 531-570.
- S.T. Taher, O.T. Thomsen, J.M. Dulieu-Barton, S. Zhang. 2011.** Determination of mechanical properties of PVC foam using a modified Arcan fixture. *Composites: Part A*. 4 de Dezembro de 2011, pp. 1698-1708.
- Saied, R.O., Shuaeib, F.M. e Hamouda, A.M.S. 2007.** Energy absorption capacities of square tubular structures. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 01 de Setembro de 2007.
- Smith, Carrol. 1978.** *Tune to Win*. Fallbrook : Aero Publishers, Inc, 1978.
- Tagarielli, V.L., Deshpande, V.S. e Fleck, N.A. 2008.** The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood. 2008, pp. 83-91.
- Tan, Henry e Qu, S. 2010.** Impact of Cellular Materials. *CISM International Centre for Mechanical Sciences Volume 521*. 2010, pp. 309-334.
- Tan, P.J., et al. 2005.** Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I - experimental data and observations. *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 53. 2005, pp. 2174-2205.
- . **2005.** Dynamic compressive strength properties of aluminum foams. Part II - "shock" theory and comparison with experimental data and numerical models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 53. 2005, pp. 2206-2230.
- Thomas, Thonnia, et al. 2002.** Dynamic compression of cellular cores: temperature and strain rate effects. *Composite Structures* 58. 2002, pp. 505-512.
- Thomas, Tonnia, et al. 2004.** High Strain Rate Response of Cross-linked and Linear PVC Cores. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2004, pp. 739-749.

**Tita, Volnei e Caliri Junior, Mauricio Francisco. 2012.** Numerical simulation of anisotropic polymeric foams. *Latin America Journal of Solids and Structures*. 2012, pp. 1-21.

**Walley, S. M. e Field, J. E. 1994.** Strain Rate Sensitivity of Polymers in Compression from Low to High Rates. *DYMAT Journal*. Setembro de 1994, pp. 211-227.

## 11 Anexos

### Anexo A

#### Resumo do regulamento do Formula SAE para o atenuador de impacto.

Segundo o item T3.3 da regra da competição, o atenuador de impacto deve ser um dispositivo deformável capaz de absorver energia localizado no quadro frontal da estrutura.

Já o item T3.21 de (Regra2013) impõe uma série de requisitos funcionais no projeto deste dispositivo. São estes:

1. Instalado em frente ao quadro frontal
2. Ter um comprimento mínimo de 200 mm
3. Ter no mínimo 100 mm de altura e 200 mm de largura
4. Deve ser tal que não pode penetrar o quadro frontal em caso de impacto
5. Deve ser montado diretamente ao quadro frontal da estrutura e não pode ser parte da lataria não estrutural
6. A montagem do atenuador do impacto deve ser tal que permita esforços transversais e verticais em caso de colisão fora de centro e fora de eixo.
7. Uma placa anti-intrusão deve ser integrada ao atenuador de impacto, de espessura mínima de 1,5 mm caso seja de aço ou 4 mm caso seja em alumínio. Ela pode ser aparafusada ou soldada ao quadro frontal da estrutura
8. O atenuador de impacto deve ser preso por pelo menos 4 parafusos M8 grau 8.8

Ainda segundo a regra, o projeto do atenuador de impacto deve ser validado através de um relatório. O item T3.22 descreve uma série de requisitos para a validação da capacidade de absorção de energia do atenuador de impacto. Segundo este item:

1. O atenuador de impacto deve ser capaz de absorver toda a energia cinética envolvida no seguinte caso hipotético: uma massa de 300 kg, colidindo a 7 m/s; a aceleração média deve ser inferior a 20 g e o pico de aceleração, inferior a 40 g; o dispositivo deve ser capaz de absorver 7350 J de energia
2. No caso de utilização de acelerômetros, a aceleração média deve ser calculada nos dados sem tratamento, e para o pico de desaceleração, pode ser utilizado um filtro passa baixa tipo Butterworth (-3dB a 100 Hz)
3. Durante o teste, é necessário um modelo da placa anti-intrusão com o mesmo método de fixação ao quadro superior previsto no projeto. Esta placa deve

estar a pelo menos 50 mm de qualquer objeto rígido. Nenhuma parte da placa pode se deslocar mais de uma polegada (25,4 mm) da posição original de projeto.

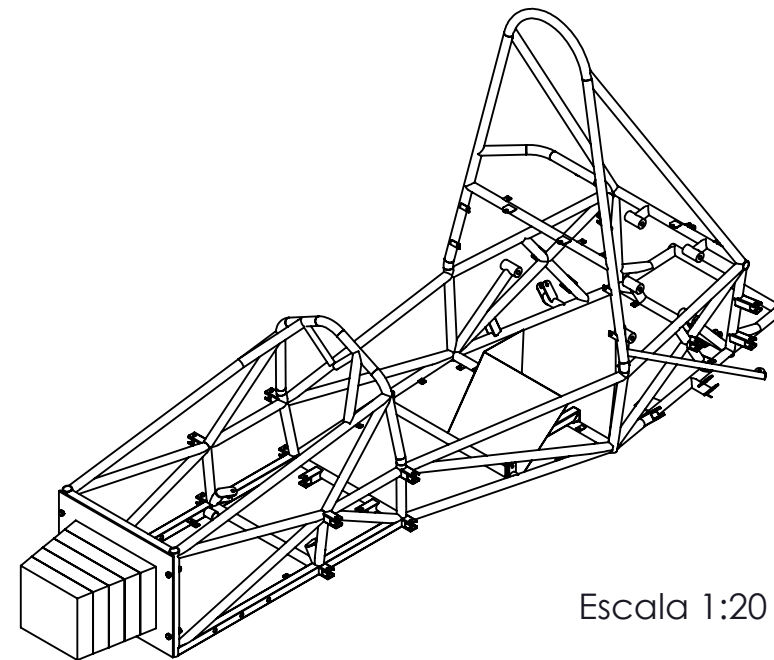
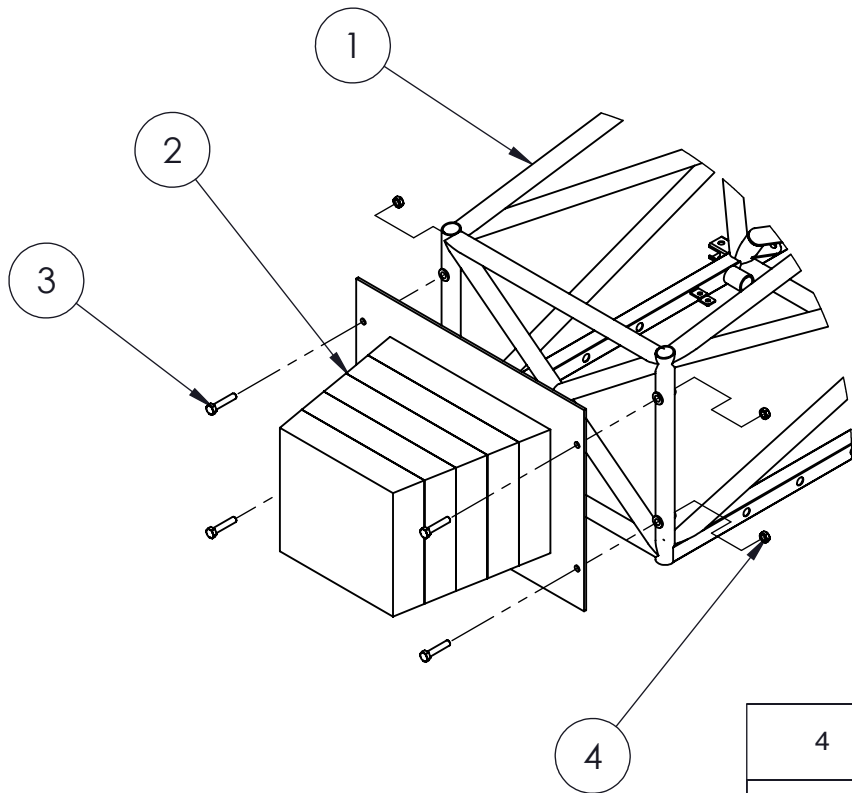
Outras exigências são feitas para que o atenuador seja validado durante a competição, mas muitas delas são questões de documentação de relatório, ou então não se aplicam a equipe da UFRJ, como é o caso de considerações para estrutura monocoque. Todas as considerações relevantes para projeto foram descritas dentro desta seção do texto.

## **Anexo B**

### **Desenhos de Projeto do Atenuador de Impacto**

Os desenhos são apresentados na seguinte ordem:

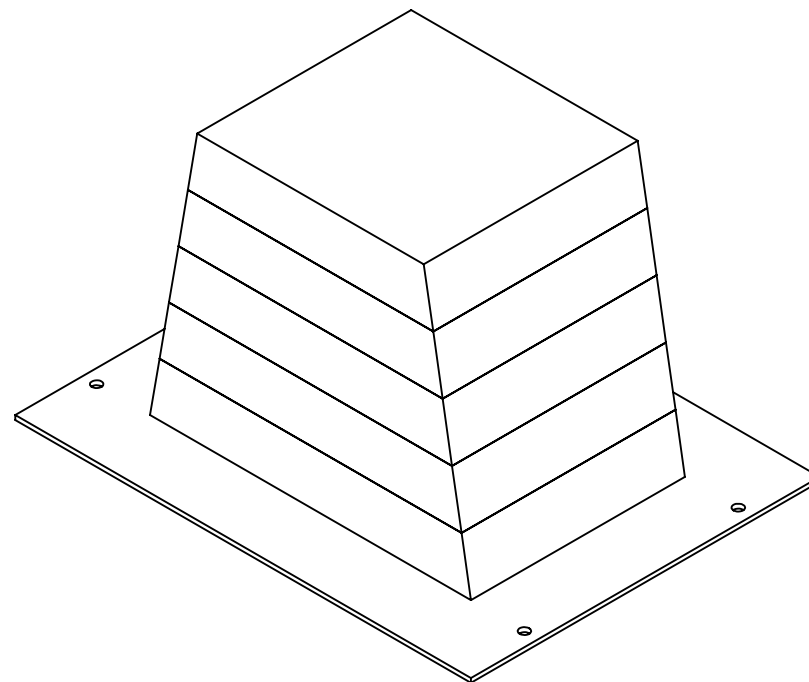
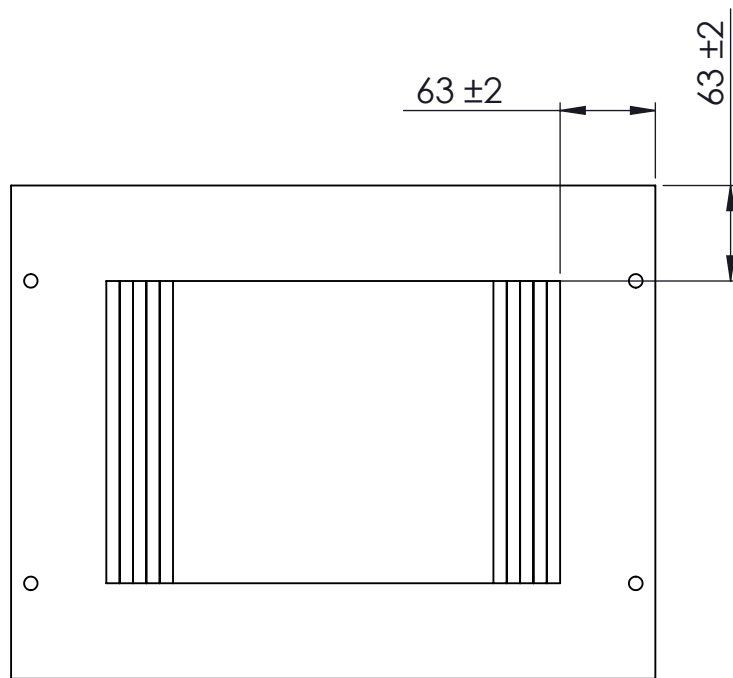
1. Montagem do Atenuador de Impacto à Estrutura
2. Montagem Atenuador de Impacto + Placa Anti-Intrusão
3. Atenuador de Impacto
4. Placa Anti-Intrusão
5. Detalhe das Modificações da Estrutura
6. Bucha de Reforço



Escala 1:20

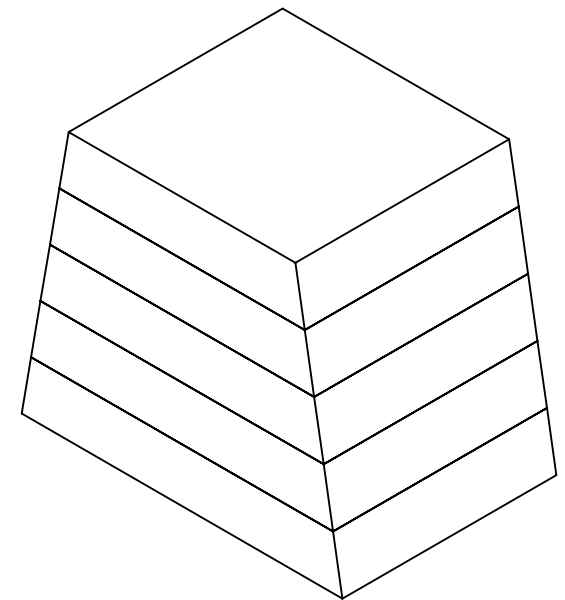
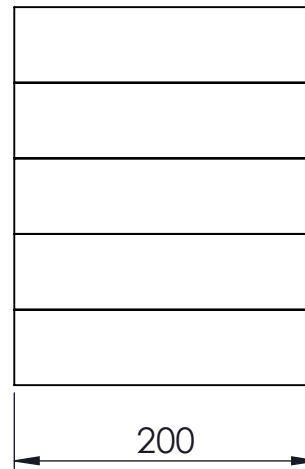
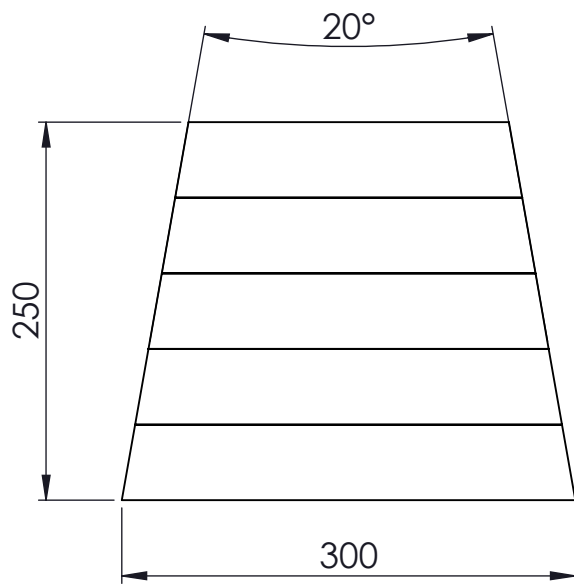
4	Porca M8	4	Porca M8
3	Parafuso M8	4	Parafuso M8, comprimento de rosca 40 mm
2	Montagem Atenuador + Anti-Intrusão	1	-
1	Estrutura	1	-
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
Montagem Atenuador de Impacto à Estrutura			Qntd: -
Autor: Luiz Otavio Pereira		Material:	1º Diedro
Trabalho de Conclusão de Curso		Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da Equipe Icarus de Formula SAE	Data: 18/08/2013
		UFRJ	Escala: 1:10
			Unidade: mm





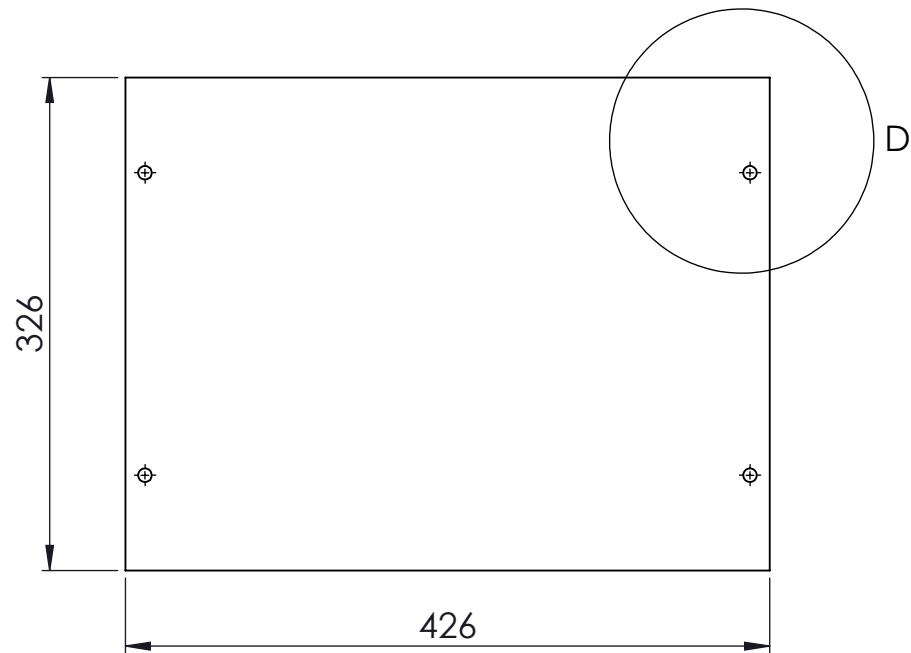
Nota: União das duas peças feita por adesivo à base de epóxi

2	Placa Anti-intrusão	1	Chapa de Alumínio, Espessura 4 mm	
1	Atenuador de Impacto	1	Espuma de PVC	
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões	
Montagem Atenuador + Placa Anti-Intrusão			Qntd:	1º Diedro
Autor: Luiz Otavio Pereira		Material:		Data: 18/08/2013
Trabalho de Conclusão de Curso		Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da Equipe Icarus de Formula SAE		UFRJ
				Unidade: mm

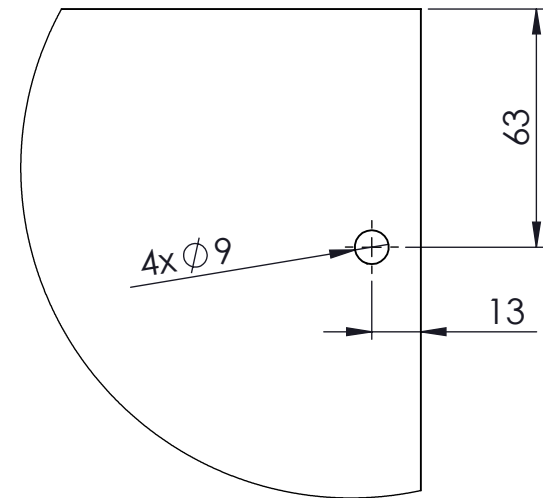


Nota: 5 camadas de 50 mm de espuma de PVC, coladas com adesivo à base de epoxi

Atenuador de Impacto		Qntd: -	1º Diedro
Autor: Luiz Otavio Pereira	Material: Espuma de PVC, espessura 50 mm	Data: 18/08/2013	Escala: 1:5
Trabalho de Conclusão de Curso	Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da Equipe Icarus de Formula SAE	UFRJ	Unidade: mm

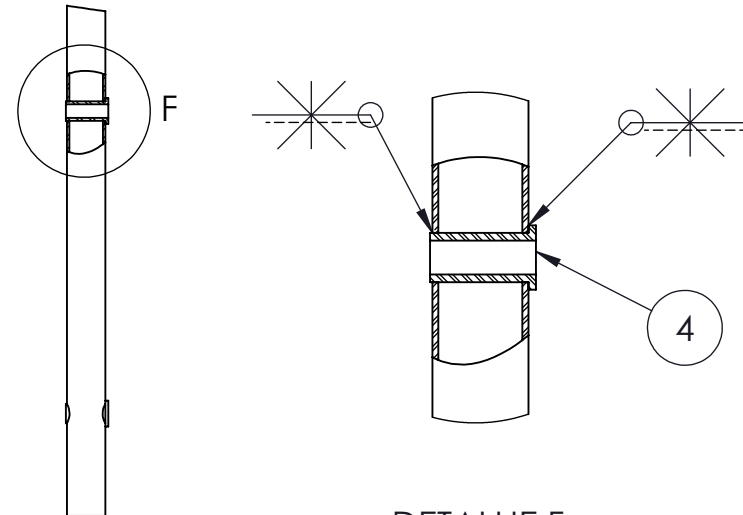
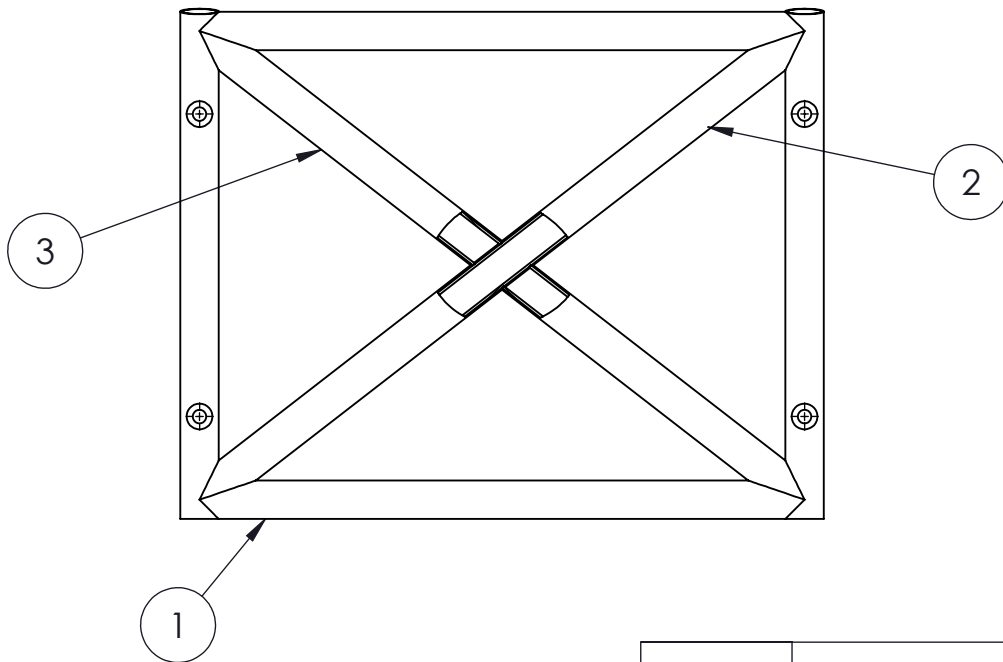


Espessura: 4 mm

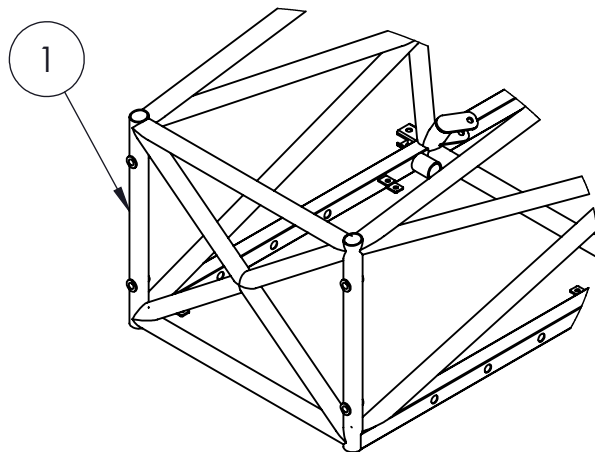


DETALHE D  
ESCALA 1 : 2

Placa Anti-Intrusão		Qntd: 1	1º Diedro
Autor: Luiz Otavio Pereira	Material: Chapa de Alumínio 6063, Espessura 4 mm	Data: 18/08/2013	Escala: 1:5
Trabalho de Conclusão de Curso	Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da Equipe Icarus de Formula SAE	UFRJ	Unidade: mm

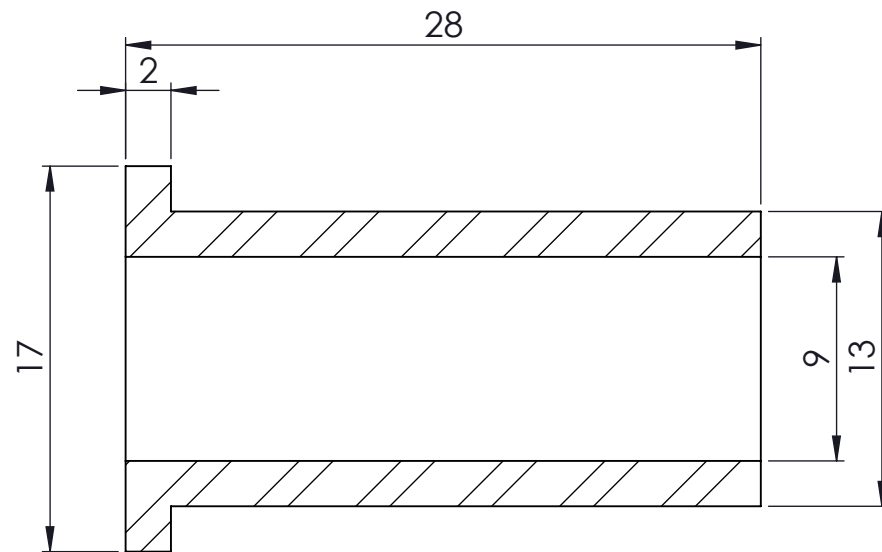
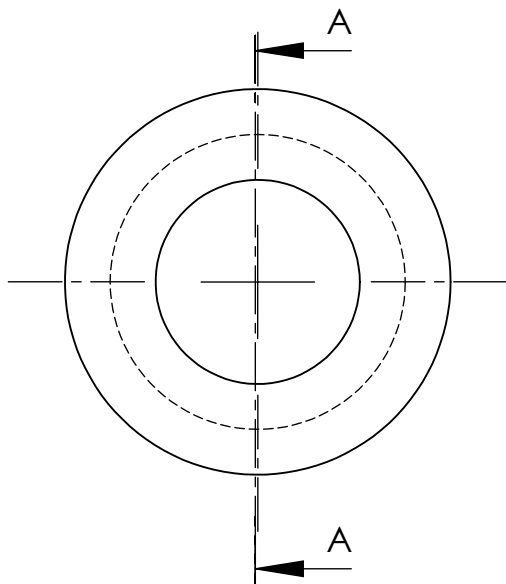


DETALHE F  
ESCALA 1 : 2



4	Bucha de Reforço	4	Aço AISI 1020, $\phi$ 18mm x 28 mm
3	Tubo Diagonal B	2	Aço AISI 1020, $\phi$ 25,4 mm x 1,6 mm x 253 mm
2	Tubo Diagonal A	1	Aço AISI 1020, $\phi$ 25,4 mm x 1,6 mm x 506 mm
1	Bulkhead Original	1	-
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões

Detalhe das Modificações da Estrutura			Qntd: -	1º Diedro
Autor: Luiz Otavio Pereira		Material:		Data: 18/08/2013
Trabalho de Conclusão de Curso		Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da Equipe Icarus de Formula SAE		UFRJ
				Unidade: mm



SEÇÃO A-A

Bucha de reforço		Qntd: 4	1º Diedro
Autor: Luiz Otavio Pereira	Material: Aço AISI 1020, $\phi$ 20 mm x 40 mm	Data: 18/08/2013	Escala: 3:1
Trabalho de Conclusão de Curso	Projeto de um atenuador de impacto para o protótipo da Equipe Icarus de Formula SAE	UFRJ	Unidade: mm

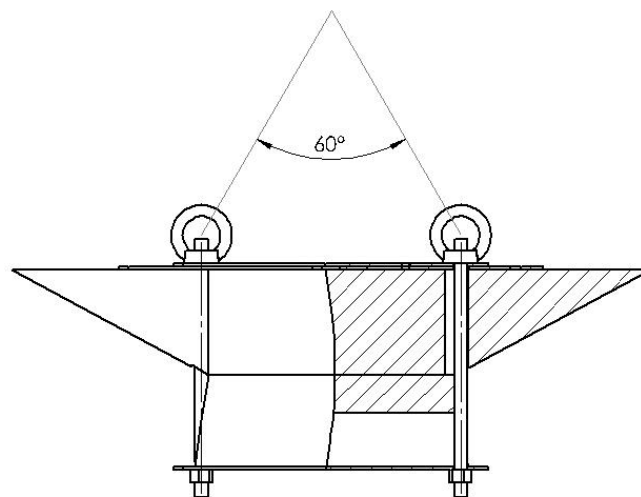
## Anexo C

### Montagem do experimento de queda livre

Para a realização do experimento de impacto, foi necessária uma preparação para garantir a segurança das pessoas ao redor do experimento, evitar danos aos laboratórios ou aos instrumentos utilizados, e também garantir que o experimento tenha resultados mais coerentes possível.

O experimento foi projetado para utilizar ao máximo os recursos já disponíveis nos laboratórios da universidade. O esquema de teste de queda livre mostrou-se ser o mais fácil de ser realizado, pois não necessita de estruturas complexas auxiliares, e nem de mecanismo para dar movimento ao corpo de queda.

O corpo de queda utilizado foi uma bigorna do laboratório de Tecnologia Mecânica da UFRJ. Foi projetado um conjunto de placas de aço para serem montadas à bigorna de forma que ela possa ser erguida por cabos de aço. Os pontos de içamento são dois olhais presos por fusos que passam por dentro de furos originais da bigorna. Uma chapa de aço foi montada na parte inferior da bigorna para servir como superfície plana na colisão com o corpo de prova da espuma de PVC.



**Figura C.1: Esquema do conjunto da massa de queda, com a bigorna, olhais e conjunto de chapas de aço.**

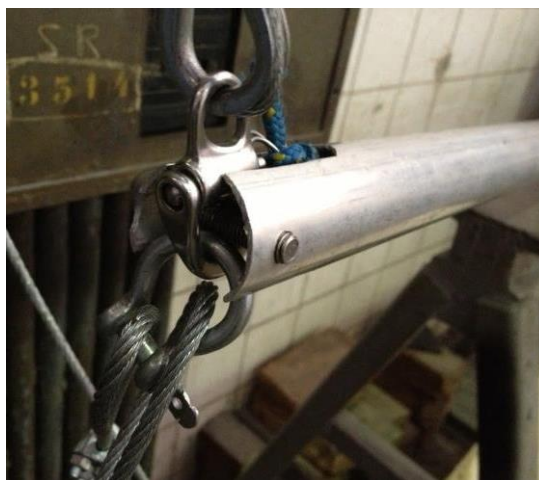
Para levantar a massa do conjunto, foram utilizados a talha do laboratório, assim como um conjunto de cabos de aço com um mecanismo de soltura rápida. O mecanismo

de soltura rápida é um gato fixo, peça semelhante a um mosquetão, utilizado por velejadores. Este mecanismo tem um pino na lateral que, quando puxado, faz com que um dos lados do gato fixo se abra. Este mecanismo pode ser acionado manualmente à distância através de uma corda. O gato fixo é então acoplado aos cabos de aço, entre a bigorna e a talha, e atua como um mecanismo que pode ser acionado manualmente à distância através de uma corda.



**Figura C.2: Detalhe do gato fixo.**

Para que todo o conjunto do corpo de queda não seja deslocado quando o mecanismo for acionado, foi projetado um tubo com um pino na extremidade, que deve ser passado por dentro da haste móvel do gato fixo.



**Figura C.3: Detalhe do mecanismo de acionamento para a soltura rápida da bigorna.**

Dessa forma, o operador que aciona o mecanismo segura o tubo e puxa a corda que passa por dentro do mesmo. Enquanto a corda presa ao pino do gato fixo puxa todo o conjunto, o pino do mecanismo de acionamento empurra o gato fixo, impedindo grandes deslocamentos do conjunto com a bigorna e os cabos de aço.



**Figura C.4: Ilustração de como o operador é capaz de acionar o mecanismo à distância.**

Para não danificar o chão do laboratório, a base da bigorna foi escolhida como apoio para o corpo de prova durante a realização dos ensaios. Por ser robusta e ter apoios bem estáveis, acredita-se que ela não irá influenciar nas medições.



**Figura C.5: Imagem da massa de queda utilizada, em cima do apoio rígido.**

Por outro lado, a base escolhida tem uma altura de aproximadamente 50 cm. Para reforçar a proteção do chão, foi posicionado ao redor da base da bigorna um arranjo de pneus, placas de madeira e espuma de poliuretano. Assim, caso a bigorna erre o alvo, ou caso ela tombe para os lados, o conjunto amortecerá a queda e evitará o contato direto com o solo.





**Figura C.6: Imagem da proteção ao redor da bigorna.**

Além disso, foi também projetada uma combinação de cabos de aço secundários, para que, no caso da bigorna tombar, ela não virar de ponta a cabeça, já que isto poderia implicar na danificação dos acelerômetros ou outros acidentes. Estes cabos são presos à bigorna através dos quatro mosquetões posicionados nos quatro cantos da placa superior da bigorna.



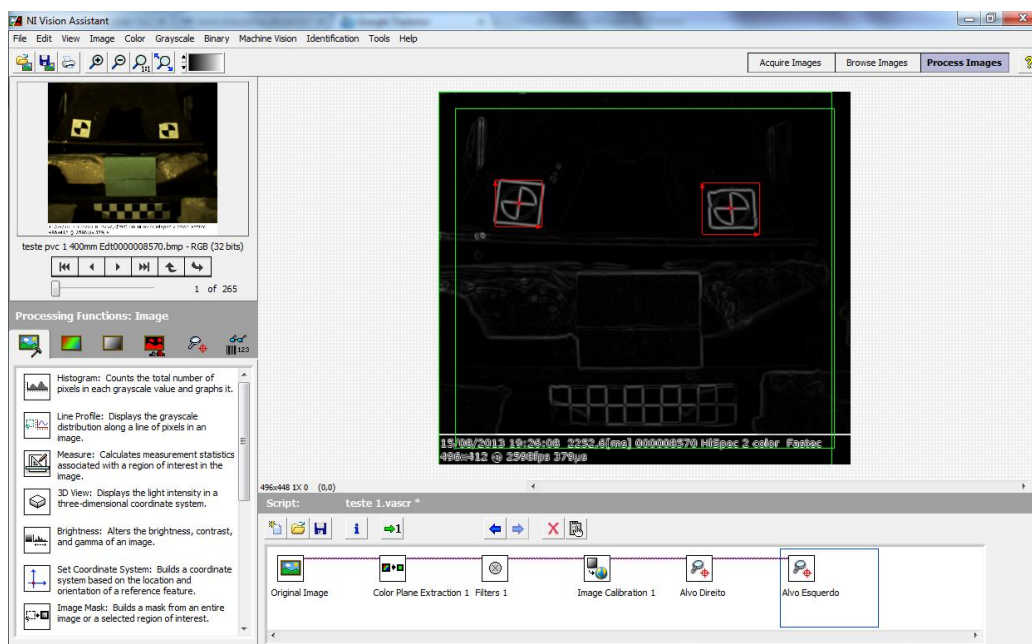
**Figura C.7: Imagem obtida antes da realização do ensaio 4. É possível ver a câmera de alta velocidade posicionada, e também as espumas de poliuretano posicionadas ao redor do alvo, como proteção extra.**

Ainda para proteger os acelerômetros, foi fabricada uma proteção em alumínio, que é aparafusada a placa superior do conjunto de queda. Tal proteção pode ser observada na figura C.3.

## Anexo D

### Procedimento para a utilização do software de tratamento de imagens

Para a obtenção de dados sobre o deslocamento da bigorna durante o impacto, foi utilizada uma rotina de tratamento de imagens. Esta rotina se resume à: extrair as cores da imagem colorida; aplicar um filtro, para facilitar o algoritmo a encontrar os alvos; calibragem da imagem, para identificar a correlação pixels x milímetros; duas correspondências de padrão, onde treinamos o algoritmo para encontrar os alvos direito e esquerdo da imagem.



**Figura D.1: Exemplo do padrão de reconhecimento dos alvos para o ensaio 1.**

O software realiza o tratamento de imagens. Ele tem também suporte a vídeos em formato AVI, mas na realidade ele converte o vídeo para arquivos bitmap antes de realizar o tratamento. Logo, é preferencial o uso de formatos de imagem para não perder qualidade e consequentemente, precisão.

A extração de cores é feita para tornar a imagem padrão 8 bits. Este é o padrão suportado pelas funções de reconhecimento de padrão, utilizadas para localizar o alvo. (*Image>Color Plane Extraction*)

Em seguida, o filtro é escolhido empiricamente de forma que os alvos fiquem realçados na imagem. (*Grayscale>Filters*)

A calibração da imagem é feita através de alguma referência de dimensões conhecidas na imagem. Repare que a calibragem é feita em um único quadro da filmagem, isso significa que a escala não precisa estar presente durante toda a filmagem. Para o caso em questão, foi utilizado um adesivo quadriculado, de dimensões 130 mm x 30 mm, fixados à base da bigorna. É possível também calibrar distorções da lente a partir de uma malha de pontos, mas esta opção não foi utilizada no tratamento de dados. (*Image>Image Calibration*)

Finalmente, é ativado o recurso de reconhecimento de padrão. Para ensinar o padrão, basta desenhar um retângulo em volta do alvo que se deseja reconhecer. Foi marcada a opção de reconhecer o padrão girado, caso o corpo sofra pequenas rotações. É importante notar também que é necessário escolher através de um retângulo verde a região na imagem onde o código irá procurar o alvo. (*Machine Vision>Pattern Matching*).

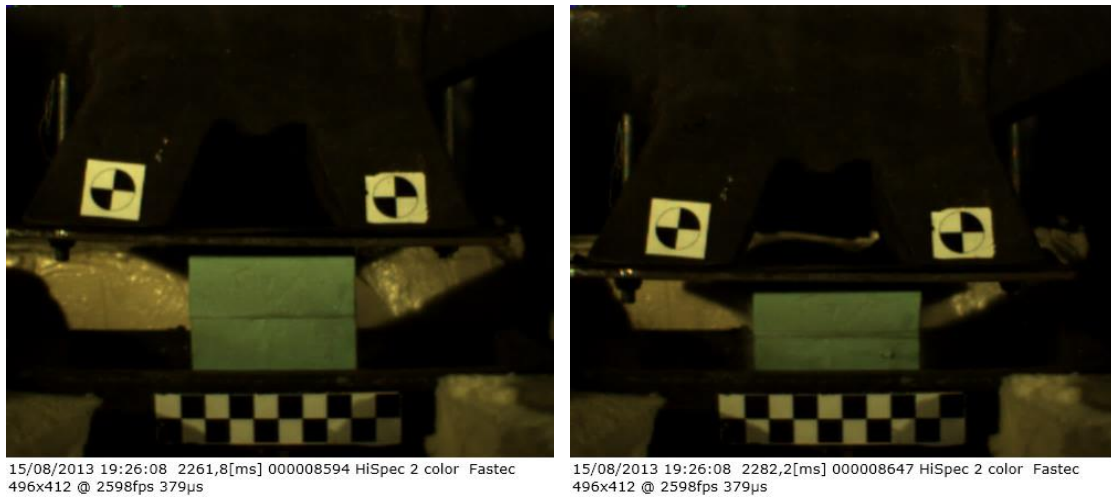
Finalmente, é possível analisar um lote de imagens a partir da configuração realizada. O programa salva em um arquivo .txt o status se o alvo foi encontrado ou não em cada quadro, e caso afirmativo, imprime as posições XY em pixels e em milímetros, na escala calibrada. (*Tools>Batch Processing*)

Note que o software faz interface com o LabView. O script criado dentro dele pode ser transferido para o primeiro a partir de uma opção exportar para o LabView, para ser integrado a uma rotina mais complexa, ou então para fazer um pós tratamento dos dados de posição dos alvos, etc.

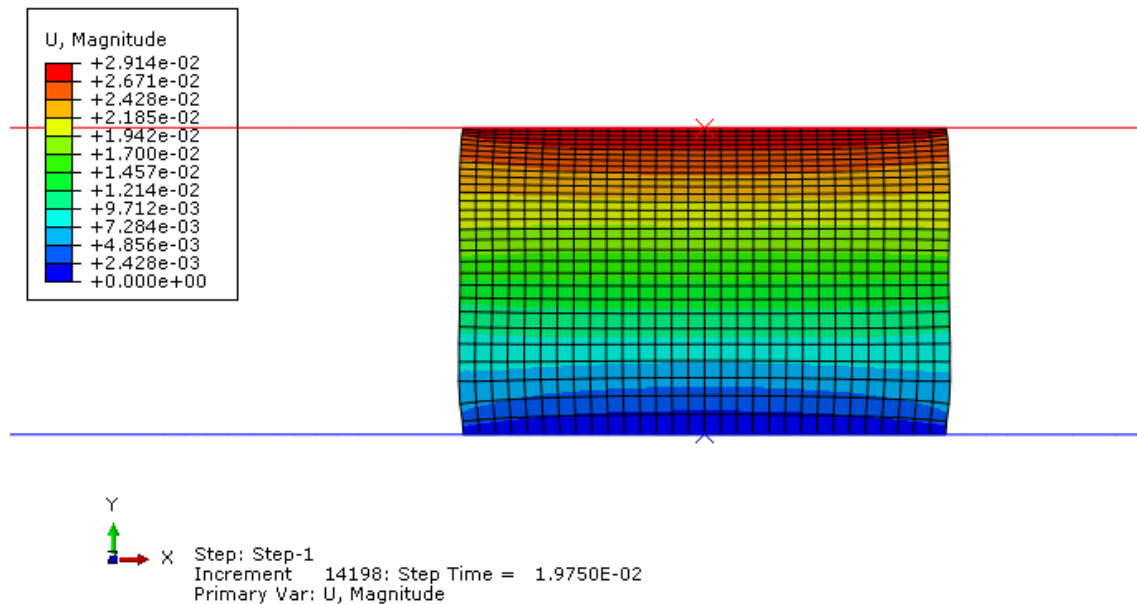
# Anexo E

## Imagens dos ensaios de queda livre

### Ensaio 1

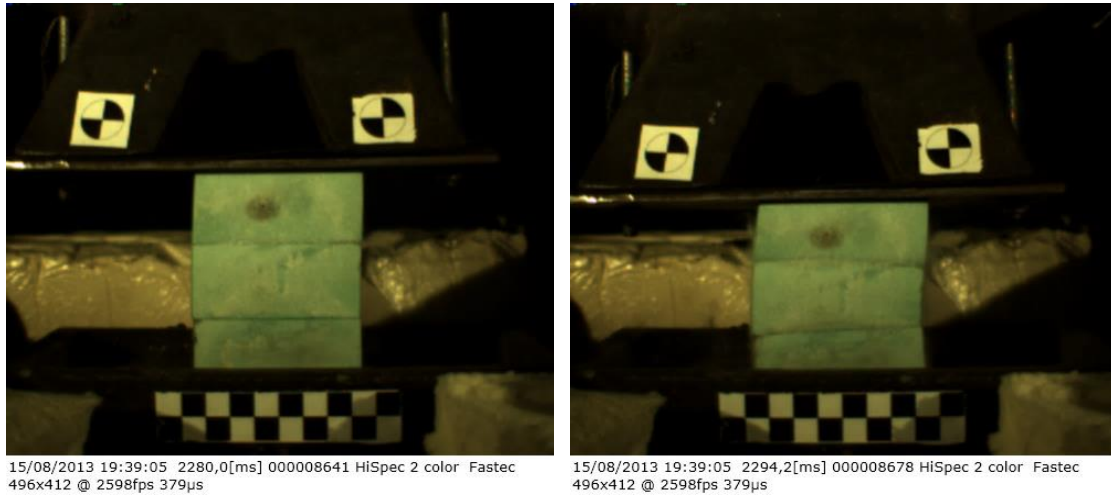


**Figura E.1: Imagens da câmera de alta velocidade para os instantes de início de contato e deformação máxima durante o ensaio 1.**

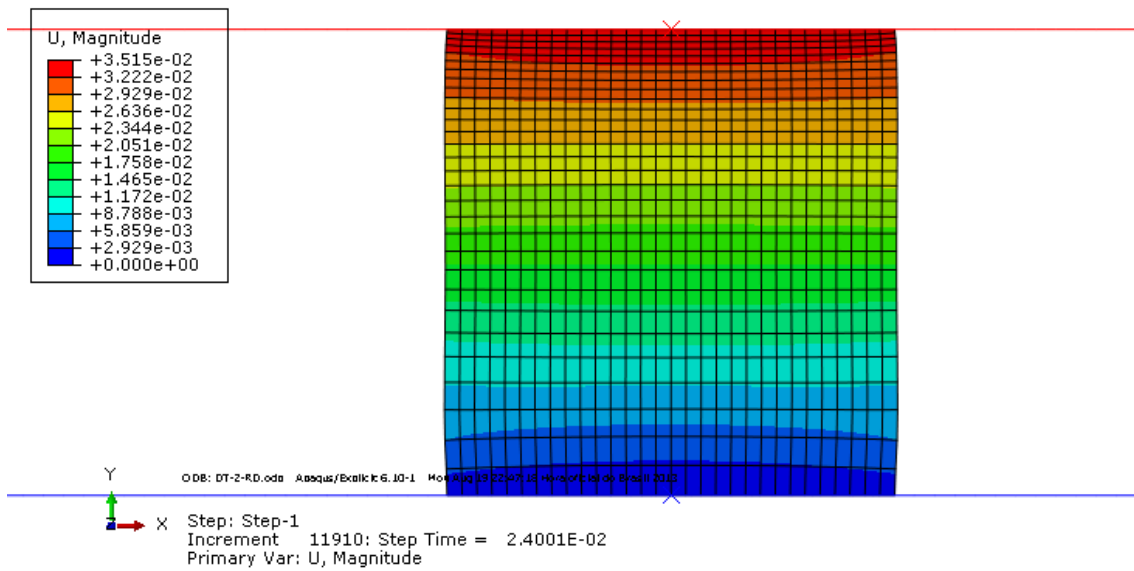


**Figura E.2: Imagem da deformada do corpo de prova para a simulação do ensaio 1.**

## Ensaio 2

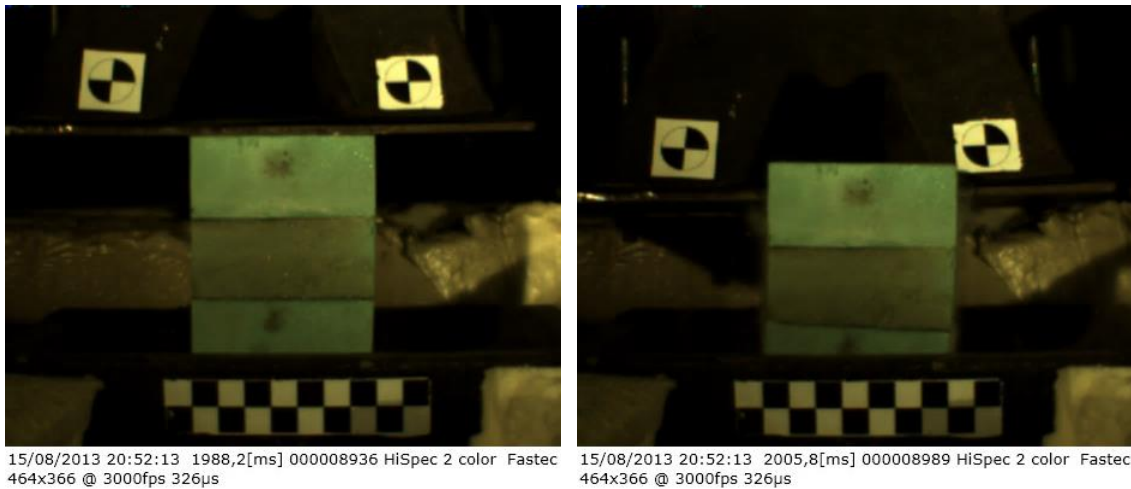


**Figura E.3: Imagens da câmera de alta velocidade para os instantes de início de contato e deformação máxima durante o ensaio 2.**

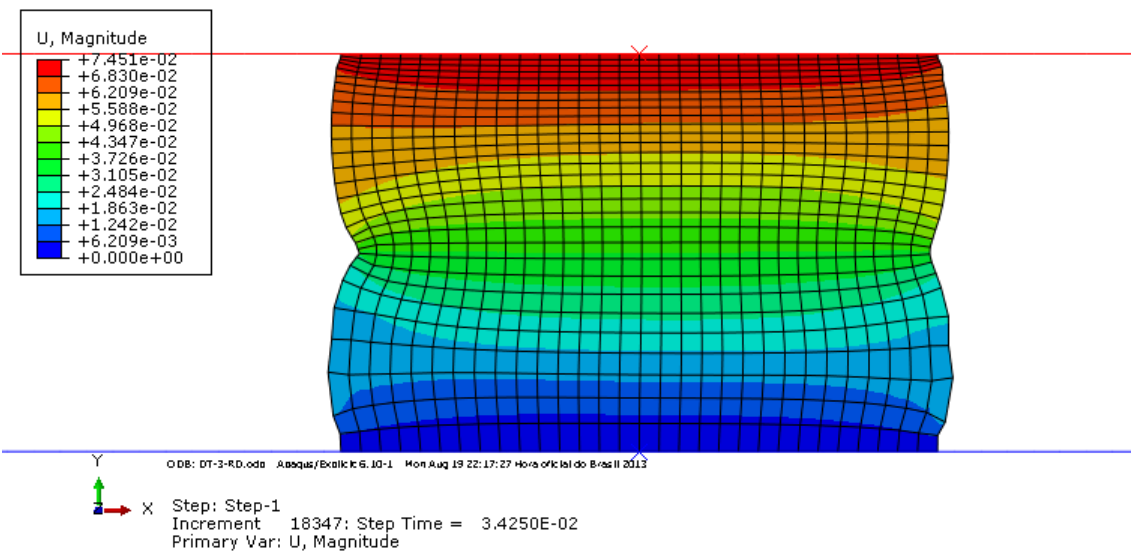


**Figura E.4: Imagem da deformada do corpo de prova para a simulação do ensaio 2.**

## Ensaio 3

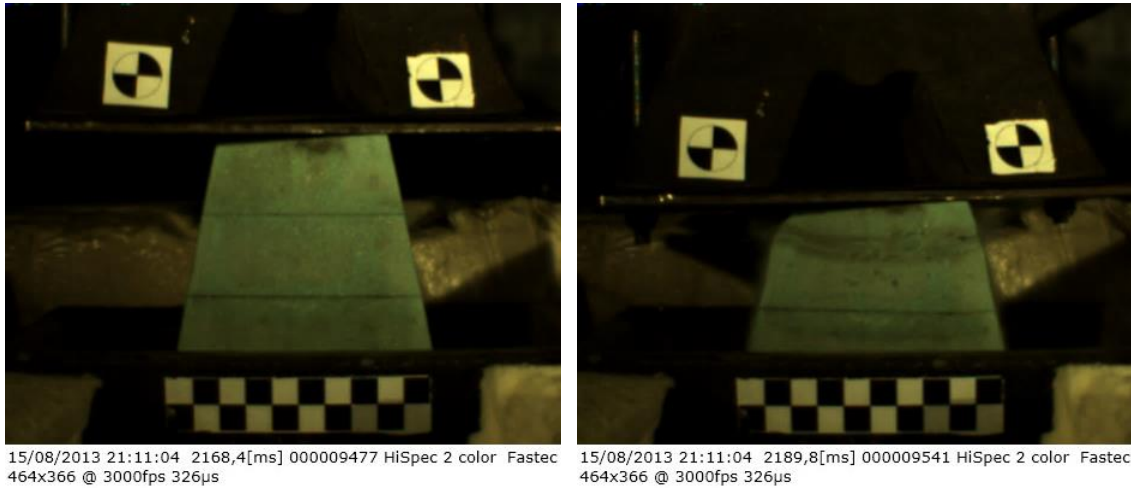


**Figura E.5:** Imagens da câmera de alta velocidade para os instantes de início de contato e deformação máxima durante o ensaio 3. É possível notar na imagem à direita que o corpo de prova não foi inteiramente esmagado em sua seção transversal.

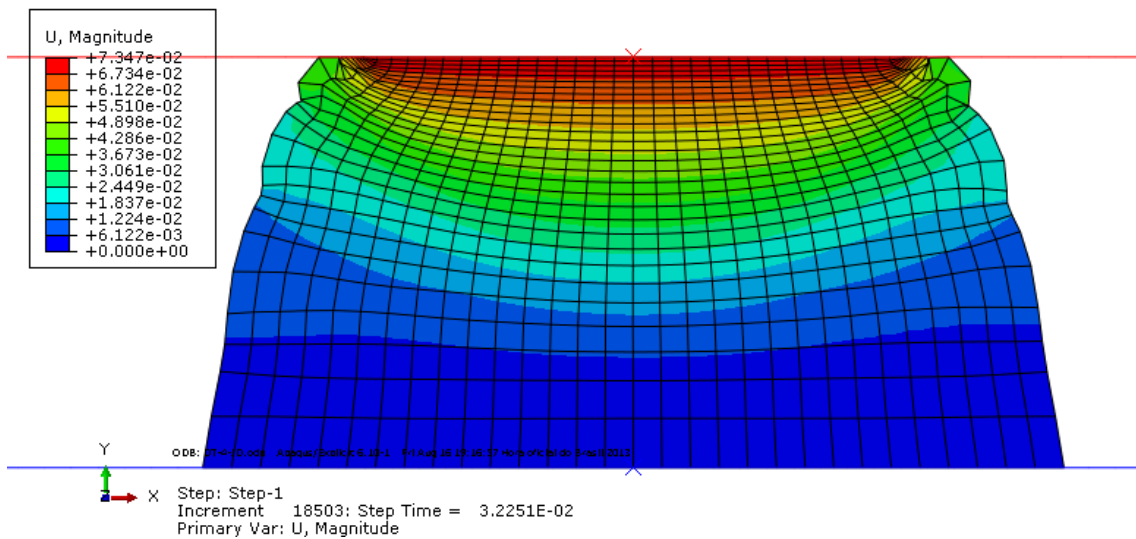


**Figura E.6:** Imagem da deformada do corpo de prova para a simulação do ensaio 3.

## Ensaio 4



**Figura E.7:** Imagens da câmera de alta velocidade para os instantes de início de contato e deformação máxima durante o ensaio 4.



**Figura E.8:** Imagem da deformada do corpo de prova para a simulação do ensaio 4.

## **Anexo F**

### **Vídeos filmados com a câmera de alta velocidade.**

Abaixo, o leitor pode encontrar o endereço para a visualização na internet dos vídeos dos ensaios filmados com a câmera de alta velocidade.

Ensaio 1: <http://youtu.be/mYPFkHbfWxA>

Ensaio 2: <http://youtu.be/7DsCuDUtYIY>

Ensaio 3: <http://youtu.be/U4a6fn04ZTk>

Ensaio 4: <http://youtu.be/V12RDFYfHns>