



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMA DE AMORTECIMENTO
ENCAPSULADO**

Autores: Thayza Denize Feitoza de Oliveira
Orientadora: MSc. Danilo dos Santos Oliveira
Coorientador: MSc. José Henrique de Oliveira

Brasília, DF
2018



THAYZA DENIZE FEITOZA DE OLIVEIRA

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMA DE AMORTECIMENTO ENCAPSULADO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientadora: MSc. Danilo dos Santos Oliveira

Coorientador: MSc. José Henrique de Oliveira

Brasília, DF

2018

CIP – Catalogação Internacional da Publicação *

OLIVEIRA, Thayza Denize Feitoza de.

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMA DE AMORTECIMENTO ENCAPSULADO/ Thayza Denize Feitoza de Oliveira. Brasília: UnB, 2018. 33 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) - Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2018. Orientação: Danilo dos Santos Oliveira.

1. Elastômero. 2. Simulação. 3. *ANSYS Workbench*. I. OLIVEIRA, Danilo dos Santos. II. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMA DE AMORTECIMENTO ENCAPSULADO.

CDU Classificação XXX



SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMA DE AMORTECIMENTO ENCAPSULADO

Thayza Denize Feitoza de Oliveira

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 05/07/2018 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

MSc. Danilo dos Santos Oliveira, UnB/FGA
Orientador

MSc. José Henrique de Oliveira, UnB/FGA
Co-Coorientador

Dr. Rhander Viana, UnB/ FGA, UnB/FGA
Membro Convidado

MSc. Von Braun Richter, CAESB
Membro Convidado

Brasília, DF
2018

AGRADECIMENTOS

A minha família, minha mãe Maria Auxiliadora e ao meu padrasto Beneti Nascimento, que me apoiaram em todos os estágios do final do curso e do TCC.

Ao meu supervisor de estágio Lair Lima Brito por me apoiar e ajudar em todo processo do TCC, me aconselhando e me dando força.

Ao meu Orientador MSc. Danilo dos Santos Oliveira e meu Coorientador MSc. José Henrique de Oliveira, pela orientação, ajuda, apoio, dedicação e paciência para escrever esse trabalho.

Ao professor Rhander Viana, sempre disposto a ajudar os alunos nos trabalhos do curso. Isso foi essencial para a conclusão do curso.

Aos meus amigos de graduação que me ajudaram no decorrer do curso a enfrentar as dificuldades e não desistir do curso.

Obrigada a todos!

Obstáculos não podem parar você. Se você achar uma parede, não desista. Ache uma maneira de escalá-la, atravessá-la ou derrubá-la (Michael Jordan).

RESUMO

Os elastômeros são borrachas, sintéticas ou naturais, que podem ser usados de diversas formas, como na biomedicina no amortecimento dos danos causados pelo uso de muletas por determinado tempo. Esse uso é considerado porque os elastômeros sofrem deformação mínima e retorna ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço colocado. O objetivo geral deste trabalho é realizar a simulação computacional no software ANSYS para analisar o sistema de amortecimento da muleta canadense de acordo com os resultados obtidos na tese de mestrado de José Henrique de Oliveira. Para iniciar a simulação foi realizado testes de compressão nas borrachas, assim conseguiria obter o módulo de elasticidade das borrachas e alimentar a simulação com esses dados. Foi realizado teste dinâmico de compressão nas borrachas BS PLATINA SEMICRISTALINA A/B e DOW , com a força 1200 N e velocidade de 100N/s, assim foi possível determinar o módulo de elasticidade dos elastômeros. A simulação foi alimentada com a densidade, características elásticas e coeficiente de Poisson. Os resultados apresentados caracterizam a dureza, o módulo de elasticidade e a deformação das borracha do sistema encapsulado da tese de mestrado de José Henrique com diferentes cargas (de 750, 1250 e 5000 Newton). Com os resultados da simulação foi concluído que é necessário mais informações das características mecânicas das borrachas sintéticas para que assim possa realizar uma nova simulação e validar a sistema de amortecimento para muletas canadenses.

Palavras-chave: Elastômero. Simulação. *ANSYS Workbench*. Muleta Canadense. MEF.

ABSTRACT

Elastomers are natural or synthetic rubbers widely used, such as for cushioning medical crutches that cause certain damage to its user after a period of time. This material is often chosen due to its low deformation under directly applied efforts and because it recovers its initial length after the effort ceases. This work's main goal is to analyze the damping mechanism of Canadian crutches by computer simulation with software ANSYS, based on the results of José Henrique de Oliveira's master thesis. By means of compression tests, the rubbers' elastic modulus were calculated in order to gather initial data to feed the simulation. The parameters for the dynamic compression tests were 1200N and 100N/s, applied for the BS PLATINA SEMICRISTALINA A/B and DOW rubbers. Other parameters used were material density, elastic characteristics and Poisson coefficient. Initial results characterize the hardness, deformation and elastic modulus for the mentioned rubbers in an encapsulated system based on the master theses of Oliveira, using three different loads (750, 1250 and 5000 Newton). Since the outcome was not satisfactory, it was concluded that more information is needed regarding the mechanical characteristics of synthetic rubbers, in order to perform new simulations and validate the cushioning system of Canadian crutches.

Key-words: Elastomer. Simulation. ANSYS Workbench. Canadian Crutch. MEF

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2	HIPÓTESE	2
1.3	OBJETIVOS	2
1.3.1	Objetivos Específicos	2
1.4	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	DESCRIÇÃO DA MULETA CANADENSE	4
2.2	CARACTERIZAÇÃO DA MARCHA ASSISTIDA	4
2.3	SISTEMA DE AMORTECIMENTO	7
2.4	ELASTÔMEROS	8
2.5	MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	9
2.5.1	Análise da Malha no MEF	12
2.5.2	Formato da Malha	13
2.6	ENSAIO DE COMPRESSÃO	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS DE TESTE	16
3.2	TESTE EM RAMPA - COMPRESSÃO - EXPERIMENTAL	18
3.3	SIMULAÇÃO NO SISTEMA ENCAPSULADO	20
3.3.1	Pré Processamento	20
3.3.2	Análise Computacional	21
4	RESULTADOS	23
4.1	FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS	23
4.2	TESTE DE COMPRESSÃO	24
4.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	25
5	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de Marcha	6
Figura 2 – Ciclo da Marcha Assistida	6
Figura 3 – Similaridade Objeto x Mola	11
Figura 4 – Deslocamentos	12
Figura 5 – Equação Matricial	12
Figura 6 – Tipos de Elementos	13
Figura 7 – Deformação elástica	14
Figura 8 – Relação válidas para os esforços de compressão	15
Figura 9 – Borracha de Silicone	17
Figura 11 – Características Mecânicas	18
Figura 12 – Teste de Compressão	19
Figura 13 – Teste de Compressão	19
Figura 14 – CADs	20
Figura 15 – Malhas do sistema encapsulado duplo	21
Figura 16 – Malhas do sistema encapsulado completo	21
Figura 17 – Interface	22
Figura 18 – Borrachas Sintéticas	23
Figura 19 – [Gráfico Força x Deformação do sistema encapsulado completo e duplo - experimental	24
Figura 20 – Sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas - 750N	25
Figura 21 – Sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas - 1250N	26
Figura 22 – Sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas - 5000N	26
Figura 23 – Sistema encapsulado completo - 750N	27
Figura 24 – Sistema encapsulado completo - 1250 N	28
Figura 25 – Sistema encapsulado ccompleto - 5000N	28
Figura 26 – Gráfico Força x Deformação do sistema encapsulado completo e duplo	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de perda para diferentes materiais (FRANKOVICH, 2000).	8
Tabela 2 – Valores da Dureza Shore A das borrachas Sintéticas (HA).	23
Tabela 3 – Valores da Dureza Shore A das borrachas Sintéticas (HA)	23
Tabela 4 – Valores do Módulo de Elasticidade (PA) das borrachas sintéticas.	24
Tabela 5 – Valores da Deformação nos eixos x, y e z (mm) do sistema encapsulado duplo.	27
Tabela 6 – Valores da Deformação nos eixos x, y e z (mm) do sistema completo.	29

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO PROBLEMA

A mobilidade é essencial para a manutenção de uma vida independente, além disso interfere em vários aspectos da saúde do indivíduo, como: o padrão de funcionamento intestinal, o estado nutricional, auto conceito entre outros. A diminuição de mobilidade física predispõe às infecções do sistema respiratório e urinário (CARPENITO, 2002).

A reabilitação de membros inferiores em pós-operatórios, traumatismos e fratura é uma prática constante na fisioterapia. Nesse processo de reabilitação é essencial que haja a descarga de peso dos membros inferiores para recuperação dos pacientes no aspecto de consolidação das fraturas e de independência funcional (RESENDE; GUIMARÃES; MIRANDA, 2008).

Vários estudos mostram a relação entre forças mecânicas e a resposta de cicatrização, particularmente em fraturas (AUGAT et al., 1996). Com isso há uma necessidade de auxílio funcional para desempenhar uma determinada atividade.

A tecnologia assistiva (TA) visa proporcionar e ampliar a área de habilidades funcionais para que aja a independência e inclusão de usuários de auxílio funcional para a sua mobilidade. Os estudos e práticas aplicados visam analisar e compreender as reais necessidades de cada caso, segundo as muitas características das debilidades. Terapia ocupacional, engenharia com diversos focos, gerontologia, educação física e design são algumas áreas de relevância nos processos práticos e teóricos do desenvolvimento de tecnologias assistivas, essa abordagem dinâmica proporciona a criação de produtos e serviços voltados ao auxílio, que oportunizam uma melhor interação entre pessoa com debilidade e meio social (OLIVEIRA, 2017).

Para auxiliar a mobilidade de pessoas com membros inferiores lesionados ou amputados há o uso de muletas, que é um dispositivo auxiliar de marcha. A muleta pode ser de uso temporário ou uso permanente, com ela ocorre uma descarga de peso do membro inferior (descarga parcial com porcentagem de 10,30,50 do peso corporal) e maior equilíbrio (base de apoio) do usuário (GLISOI et al., 2012).

No mercado atual há dois principais tipos de muleta, a de antebraço e as axilares.

As muletas axilares são as que tem o apoio superior em contato com a parte da axila. O usuário coloca as mãos sobre os apoios, bloqueando seus cotovelos, apoia seu peso sobre as muletas em vez de apoiar no membro inferior lesionado. Já as muletas de antebraço são mais convenientes, pois podem ser facilmente posta de lado, as algemas de pulso permite maior flexibilidade em agarrar ou segurar as coisas. Muletas de antebraços tem um apoio, bem como a braçadeira de pulso e seu eixo pode ser ajustável (ROGERS, 2014).

Com o uso da muleta o usuário consome cerca de duas vezes mais energia para deambu-

lar do que em condições sem uso de algum apoio. O uso prolongado da muleta pode ocasionar em lesões causadas por esforço repetitivo nas mãos, punhos, cotovelos e ombros. Na fase de balanço (quando não há apoio do peso sobre os membros inferiores) o punho chega a receber três vezes o peso corporal do usuário (GLISOI et al., 2012).

Por conta dos riscos de lesões com o uso contínuo da muleta à membros superiores é importante a implementação de um sistema de amortecimento acoplado. Com um amortecimento adequado é possível reduzir a taxa de carregamento aplicada ao membro de apoio da muleta (ombro, antebraço, punhos e mãos) (GLISOI et al., 2012).

1.2 HIPÓTESE

O trabalho de Oliveira (2017) tem base projetar um sistema encapsulado com discos de elastômeros para amortecer o impacto causado nos membros superiores com o uso da muleta buscando assim, reduzir a taxa de carregamento sobre membros superiores. Com o estudo é possível um reconhecimento prévio das características da marcha e de amortecimento multifásico no sistema, porém não foi realizada uma simulação computacional nem matemática para comprovar este comportamento nos discos amortecedores.

Com base nesta abordagem é proposto neste trabalho um modelo de resposta como ocorre o amortecimento no sistema encapsulado para a muleta canadense. No estudo de (Oliveira, 2017) é levantada a hipótese de que ocorre a presença de amortecimento multifísico, este estudo busca analisar o comportamento do sistema validando ou refutando esta hipótese.

1.3 OBJETIVOS

Determinar, por meio de simulação computacional e ensaios experimentais, as características do amortecimento que ocorre no sistema encapsulado na muleta com aplicação de diferentes cargas.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver a modelagem do sistema encapsulado, aplicado na muleta canadense, em CAD (Computer Aided Design);
- Definir a configuração e material a ser aplicado do conjunto de disco de amortecedores aplicado no modelo de câmara de encapsulamento;
- Obter o Módulo de Elasticidade BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING.
- Simulação computacional, por meios de elementos finitos, do sistema encapsulado com diferentes cargas aplicadas na plataforma ANSYS;

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho se dividirá em cinco capítulos

O primeiro capítulo desse trabalho é a Introdução, a hipótese e o objetivo geral do trabalho, junto com os passos a serem seguidos para obter esse objetivo.

O segundo capítulo, a fundamentação, fala a descrição da muleta canadense, marcha assistida, amortecimento, como funciona os métodos de elementos finitos e o ensaio de compressão.

O terceiro capítulo descreve como será realizado o trabalho para analisar os resultados, os equipamentos, teste e simulação realizados. Como as amostras de teste foram fabricadas, descrição do teste de compressão para determinar o módulo de elasticidade e a análise computacional realizada no Ansys.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos testes de dureza, teste de compressão dinâmico nas borrachas sintéticas no sistema encapsulado duplo e completo, análises do sistema por meio do software Ansys e a análise dos resultados computacionais com os obtidos experimentais.

No quinto capítulo são feitas as conclusões do trabalho, se a análise computacional é válida e sugestões para sua continuação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DESCRIÇÃO DA MULETA CANADENSE

A muleta canadense é utilizada por usuários transitórios e permanente acometido por diferentes tipos de distúrbios locomotores, para suprir a incapacidade ou fraqueza do membro lesionado por meio de transferência do carregamento do membro inferior deficitário para o membro superior e possibilitar ao indivíduo recobrar a mobilidade (ROGERS, 2014).

A muleta canadense pode ser: fixa ou articulada, a diferença entre as duas é que a articulada permite o ajuste de altura do apoio para o antebraço, que deve estar ajustado a uma altura de aproximadamente 5 cm abaixo do cotovelo. Para ambas as muletas a determinação da altura adequada é aquela que proporcione uma flexão de cotovelos de aproximadamente 20 a 30° (GLISOI et al., 2012).

Comparado a outros dispositivos a utilização da muleta canadense acarreta vantagens, com suas características construtivas os usuários têm maior controle e equilíbrio durante o seu uso, pois permite a execução de movimentos mais elaborados e a redução do risco de lesões típicas do uso de muletas axilares (OLIVEIRA, 2017).

A muleta possui uma estrutura composta por: uma ponteira de borracha natural na base do instrumento responsável por aderir ao solo e amortecer os impactos; uma haste de apoio regulável que permite o ajuste a antropometria do usuário; uma estrutura composta por um punho que acomoda a mão do usuário e a estrutura de apoio para o manguito; e o manguito que é uma abraçadeira responsável pela acomodação do antebraço dando estabilidade ao instrumento, pode ser articulada ou fixa.

Para selecionar os materiais a utilizar na fabricação da muleta canadense tem que considerar as solicitações dos ensaios dispostos na norma ISO 11334-1,2007, no que diz respeito às características e respostas estruturais e mecânicas. A norma ISO 11334-1,2007 também determina toda parametrização dimensional e ensaios necessários para validação da muleta canadense, a interação usuário/instrumento é realizada por meio de dois pontos de pega o punho e o manguito. Estes contatos interfaciais são utilizados no apoio e estabilidade durante o ciclo de marcha assistida (OLIVEIRA, 2017).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA MARCHA ASSISTIDA

O bipedismo é uma característica evolutiva hereditária que se originou das mudanças produzidas pelo meio ambiente, atendendo a necessidade de cobrir grandes distâncias e realizar movimento elaborados durante a marcha, isso garantiu vantagens competitivas ao homem moderno (OLIVEIRA, 2017).

A marcha pode ser definida como uma forma de progressão bípede na qual movimentos repetitivos dos membros inferiores alternam períodos de suporte duplo, e suporte único. O suporte duplo é caracterizado pelo contato com o solo por ambos os pés, enquanto no suporte único apenas um pé sustenta o corpo e o outro sofre movimento (BLAIR et al., 2001).

Lesões transitórias ou permanentes de diferentes níveis nesses sistemas estão associadas aos principais problemas de locomoção e resultam na limitação funcional dos indivíduos acometidos. A reeducação da marcha visa proporcionar a recuperação funcional e a adaptação frente às incapacidades originadas por uma lesão (OLIVEIRA, 2017).

Os efeitos da carga sobre as articulações e músculos dos membros superiores foram estudados no passado. Esses estudos concentraram-se sobre o uso da muleta e outros auxiliares de pé usando uma plataforma de força para poder determinar a força sofrida no membro superior durante todo o ciclo da marcha. Transdutores de força foram colocados na ponta da muleta, e em cada braço da muleta perto da área da axila. Com isso, foi possível determinar que a palma contém 44,4 do peso corporal no pico da força ao longo do ciclo da marcha (ROGERS, 2014).

Os métodos predominantes na análise clínica da marcha são a medição da cinemática, da cinética e da atividade muscular durante o ciclo de marcha: a cinemática consiste na caracterização do movimento sem referências às forças envolvidas; a cinética descreve as forças internas e externas que atuam num corpo em movimento; a eletromiografia define a atividade muscular que controla os movimentos durante a marcha; a pressão plantar permite a análise pormenorizada da distribuição da carga entre a planta do pé e a respectiva superfície de contato (SOUSA et al.,).

As metodologias de análise não são usualmente aplicadas no trabalho cotidiano por apresentarem características específicas do estudo científico da marcha, pois não há um critério específico para a prescrição e seleção dos instrumentos de apoio e suspensão.

Segundo (ROGERS, 2014), há cinco tipos de marcha assistida por muletas auxiliar ou canadense: marcha de dois pontos; marcha de três pontos; marcha de quatro pontos; marcha por balanço simples e marcha por balanço duplo. A marcha de dois, três e quatro pontos são utilizadas por pacientes que apresentam patologia motora que não comprometa o uso mínimo dos membros inferiores para o apoio na marcha, nessa condição de marcha as muletas atuam no equilíbrio e sustentação com uso do apoio simples ou duplo.

As marchas por balanço simples ou duplo são aplicadas quando a impossibilidade de utilizar o membro ferido ou/e realizar a perfeita movimentação do membro, sendo que, a mais usual marcha por balanço simples, oferece os mais altos índices de carregamento e esforço durante a deambulação (ROGERS, 2014), isso se dá porque quando no uso dessas marchas há o movimento pendular realizado durante a fase de apoio da muleta no deslocamento do corpo suspenso sobre as muletas para frente e é finalizado com o contato do membro inferior com o solo na fase de apoio da muleta toda a massa corpórea fica suspensa o que provoca o carregamento total sobre os membros superiores (OLIVEIRA, 2017).

A Figura 1 é um esquemático dos tipos de marcha apresentada no paragrafo anterior.

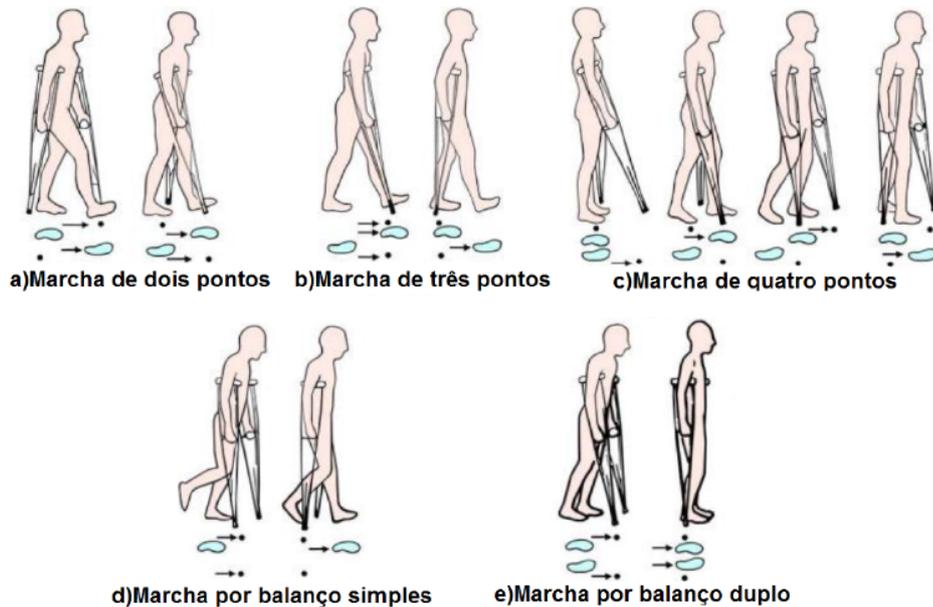


Figura 1 – **Tipos de Marcha.** As três primeiras figuras (a, b e c) representam os tipos de marcha suporte, figura (d) e (e) representam os tipos de marcha de suspensão. (OLIVEIRA, 2017)

A deambulação humana é relativamente simétrica em relação aos movimentos angulares das articulações, aos padrões de ativação muscular e à sustentação da carga pelos membros inferiores, isso permite que seja analisada de acordo com as variáveis envolvidas (FRANKOVICH, 2000). Da mesma forma, a marcha com a muleta canadense pode ser compreendida como um ciclo e dividida em duas fases distintas, a fase de apoio da muleta e a fase de balanço da muleta, como demonstrado por (CAPECCI et al., 2015), mostrado na Figura 2 (OLIVEIRA, 2017).

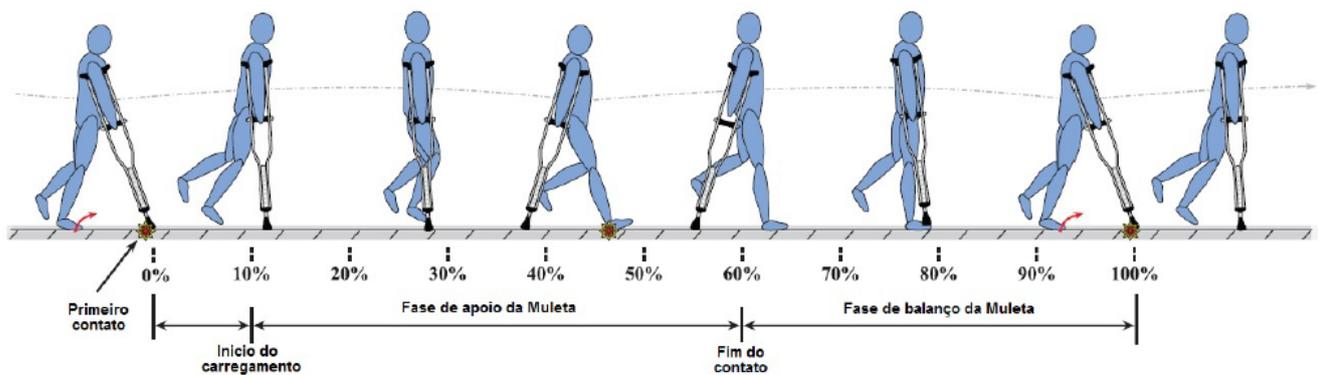


Figura 2 – **Ciclo da Marcha Assistida.** Etapas do ciclo da marcha assistida. (OLIVEIRA, 2017)

2.3 SISTEMA DE AMORTECIMENTO

O amortecimento ou atrito interno é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscopia (LAZAN, 1968), sendo particularmente sensível a trincas e micro trincas (DIETERLE; BACHMANN, 1981). É um fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada (SILVA, 2007).

A aplicação clássica do sistema de amortecimento é na engenharia mecânica (exemplo, amortecimento no sistema de suspensão de automóveis) e engenharia civil (ex: estudo de vibrações) (TONNESEN; TELLE, 2007) (COPPOLA; BRADT, 1973).

O amortecimento de um sistema ou material pode ser classificado de três formas principais: interno, estrutural e fluídico. O interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade e impurezas do material e a efeitos termoelásticos causados por gradientes locais de temperatura. Já o estrutural está associado a perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semirrígidas. Por último, o fluídico ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar (COSSOLINO; PEREIRA, 2010a).

Há diversos métodos para a determinação do amortecimento, os quais podem ser obtidos basicamente por dois caminhos: mediante a duração da resposta do sistema a uma excitação transitória (exemplo: método do decremento logarítmico) e em função da resposta do sistema em função da frequência (exemplo: método da largura de meia banda de potência). A escolha do método depende principalmente da faixa do amortecimento e da frequência de vibração (SILVA, 2007).

O sistema de amortecimento é utilizado para minimizar os efeitos nocivos da vibração, isoladores de vibração são utilizados em inúmeros produtos de engenharia com a finalidade de reduzir a transmissão de energia de um corpo para o outro (GHELLER JORDAO,).

O conhecimento do perfil de absorção de vibração do material que será utilizado é fundamental para o sucesso no projeto e desenvolvimento do produto. O poder de absorção de energia dos materiais elastômeros é em função da frequência da excitação, sendo assim, deve-se ter uma atenção especial no projeto deste tipo de sistema de isolamento, das frequências e do material a ser utilizado. É através da avaliação das propriedades dinâmicas de um elastômero que a propriedade de absorção de vibração será caracterizada (FERRY, 1980).

As características de absorção de energia podem ser medidas através de um fator adimensional chamado de fator de perda (loss fator ou tandelta), sendo esta a razão entre a resposta viscosa pela elástica do material. Materiais com alto fator de perda (e conseqüentemente com alta defasagem entre a excitação e a resposta) possuem uma componente viscosa elevada, dissipando mais energia do que materiais que possuam valores menores fatores de perda. Um fator de perda de cerca de 0,1 é, usualmente, considerado um valor mínimo para um amortecimento significativo. Quando se compara este valor entre diferentes materiais, observa-se a qualidade

superior do amortecimento que os elastômeros (FRANKOVICH, 2000).

Na Tabela 1 é possível observar a qualidade superior do amortecimento utilizando elastômeros.

Tabela 1 – Fatores de perda para diferentes materiais (FRANKOVICH, 2000).

	Fator de perda aproximado
Aluminio	0,007 – 0,005
Aço	0,05 – 0,1
Neoprene	0,1
Borracha butílica	0,4

Vale lembrar que, para materiais elastômeros, o fator de perda é a função da frequência da excitação. O desempenho da isolamento de um sistema é determinado pela sua transmissibilidade (T) ou taxa de vibração transmitida de um sistema para outro. A transmissibilidade é dependente da frequência natural de vibração, da frequência imposta e do fator de perda do material, como mostra a Equação 1 (GHELLER JORDAO,)

$$T = \frac{1 + (\eta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (\eta r)^2} \quad (1)$$

Que pode ser reduzida para Equação 2 :

$$T = \frac{1}{(1 - r^2)} \quad (2)$$

Onde:

T = transmissibilidade da vibração aplicada no material, adimensional.

r = razão entre a frequência imposta e a natural =

$$\frac{f}{f_{\eta}} \quad (3)$$

2.4 ELASTÔMEROS

Os elastômeros são polímeros (naturais ou sintéticos) que na temperatura ambiente podem sofrer deformação mínima duas vezes a seu comprimento inicial, retornando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço colocado. Os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas uma as outras, com baixa densidade de ligação cruzada (JR, 2002).

O conceito de formulação de elastômeros como é conhecido hoje é por conta da constante evolução de um processo que se iniciou no século XIX, quando Charles Goodyear descobriu a vulcanização da borracha natural com enxofre. Porém o avanço aconteceu no século XX principalmente com a invenção do automóvel e pesquisa para esforços de guerra (ROCHA, 2003).

Entre o grupo de materiais de engenharia do qual o mundo depende está os elastômeros, porém as propriedades dos elastômeros não dependem apenas da estrutura da cadeia polimérica, mas também dos compostos, que em conjunto formam sua formulação. Além dos componentes da formulação, tanto o processo de mistura desses componentes quanto o processo de conformação do artefato influenciam de maneira significativa as características do material final (ROCHA, 2003).

Na formulação de um composto elastomérico utiliza-se um grande número de ingredientes. Cada ingrediente desempenha um papel, e impacta tanto nas propriedades quanto no custo de formulação (BARLOW, 1988).

Os elastômeros têm as seguintes propriedades básicas: aceitar grandes deformações ($\geq 200\%$), mantendo boa resistência mecânica e módulo de elasticidade quando deformado; recuperar rapidamente a deformação, depois de retirado o esforço; ter recuperação total da deformação (JR, 2002).

Elastômeros possuem características borrachosa, com cadeias flexíveis, resposta rápida às solicitações mecânicas e forças moleculares secundárias fracas. Os elastômeros apresentam outro fenômeno único, ou seja, a elasticidade da borracha. Este tipo de elasticidade é muito particular, pois envolve grandes deformações (JR, 2002).

2.5 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores (AZEVEDO, 2011).

O método de elementos finitos surgiu em 1955 como evolução da análise matricial de modelos reticulados (concebida no início da década de 1930 na indústria aeronáutica britânica), com a disponibilidade de computadores digitais e devido à necessidade de projetar estruturas de modelos contínuos. Os primeiros elementos foram concebidos por engenheiros aeronáuticos para análise de distribuição de tensões em chapas de asa de avião. Sua formulação foi tratada pioneiramente por Argyris e Kelsey em 1955 (SORIANO; LIMA, 2003).

Por volta de 1963 a validade matemática do MEF foi reconhecida e o método foi expandido a partir de seu início na análise estrutural, para incluir a transferência de calor, o fluxo de águas subterrâneas, campos magnéticos, e outras áreas (AZEVEDO, 2016). O computador de propósito geral para uso dos softwares de MEF começou a aparecer no final da década de 1960

e início de 1970.

Exemplos de softwares incluem o ANSYS, ASKA, e NASTRAN. Ao final da década de 1980 os softwares estavam disponíveis em microcomputadores, completos com gráficos coloridos, pré e pós-processadores. Em meados da década de 1990 cerca de 40 mil artigos e livros sobre o método e suas aplicações haviam sido publicados (COOK, 1994) e (COOK et al., 1974).

O método dos elementos finitos (MEF) é conhecido por ser robusto e aplicável em domínios deveras elaborados. Essas também são algumas de suas vantagens sobre o método das Diferenças Finitas, também bastante popular. A ideia central do MEF é discretizar o domínio, representando-o, ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos; e resolver não o problema original (COOK et al., 2007), mas sim um que lhe é associado a sua forma fraca. No caso de um domínio plano, os elementos podem ser triângulos ou quadriláteros.

Antes do aparecimento do MEF, a análise dos meios contínuos era efetuada por resolução direta dos sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenômeno, tendo em consideração as necessárias condições fronteira. Para facilitar a aplicação desta técnica a problemas não elementares, era comum recorrer a séries de Fourier. Devido à sua complexidade, estes procedimentos só eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples (AZEVEDO, 2011).

Com o grande desenvolvimento que o MEF teve na década de 60 (COOK et al., 2007) e com a banalização do recurso ao computador, passou a ser prática corrente a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento. Este avanço é tão significativo que os outros métodos, atrás referidos, deixaram praticamente de ser utilizados. Atualmente, o seu interesse restringe-se ao de fornecer soluções teóricas de problemas simples para validar métodos aproximados (AZEVEDO, 2011).

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema (AZEVEDO, 2011).

No método de elementos finitos, toda estrutura é subdividida em partes denominadas elementos que são interligadas por nós. A posição de cada um dos nós de um elemento e os graus de liberdade que este terá para movimentação é extremamente relevante para os cálculos realizados pelo software e quanto mais nós existirem, maior será a quantidade de cálculos a serem realizados (AZEVEDO, 2016).

E a quantidade de nós depende diretamente da complexidade da estrutura e pode ser de apenas algumas dezenas até algumas dezenas de milhares de nós ou mais. Portanto, quanto mais complexa a estrutura, maior a quantidade de dados a serem processada pelo computador e mais demorada é a obtenção de resultados (AZEVEDO, 2016).

Em software utilizados para análise de MEF, como o ANSYS, uma ferramenta de simulação computacional utilizada no desenvolvimento de produtos e processos, há o métodos de análises estruturais, entre estes os mais comuns são: análise estática, modal, harmônica, dinâmica transiente, etc (AZEVEDO, 2016).

Os programas de análises se utilizam das informações existentes nos arquivos dos desenhos feitos em programas de auxílio ao desenho com o computador, CAD, para definir os domínios da geometria, entre outras coisas, mas principalmente, simular a utilização peças ou conjuntos nas condições de utilização. O software ANSYS também permitem que o desenho seja feito no próprio programa (AZEVEDO, 2016).

A geometria da peça, que originalmente é contínua, é subdividida pelo programa de análise, em elemntos com uma quantidade finita, mantendo esses elementos interligados por nós, formando aquilo que denominamos malha, este processo chama-se Discretização (AZEVEDO, 2016).

Na análise estrutural com MEF cada um dos elementos é interpretado como uma mola que possui rigidez e tamanho predeterminado. Na Figura 3 mostra a similaridade entre um objeto e uma mola carregados axialmente.

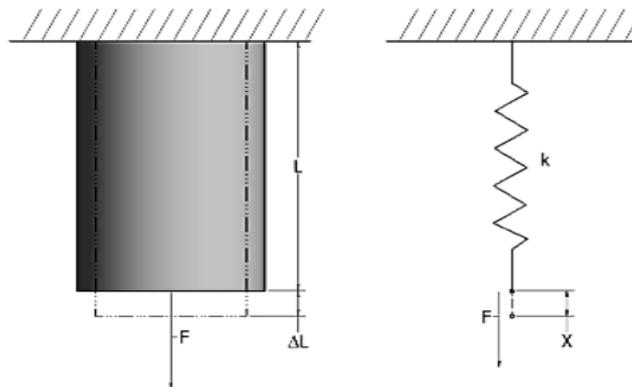


Figura 3 – **Similaridade Objeto x Mola.** Similaridade entre objeto e uma mola carregado axialmente (AZEVEDO, 2016)

As equações referentes a essa similaridade entre as equações que determinam a força de um objeto e uma mola carregada axialmente (AZEVEDO, 2016)

$$\sigma = F/A, \varepsilon = (\Delta L)/L, \sigma = E * \varepsilon \quad (4)$$

Cada um dos elementos é analisado como se fosse uma mola, como mostra a Figura 4, e contribui para a formação das matrizes nos termos de carregamento, deslocamento e rigidez. Sendo que a rigidez depende das propriedades do material e geometria da peça (AZEVEDO, 2016).

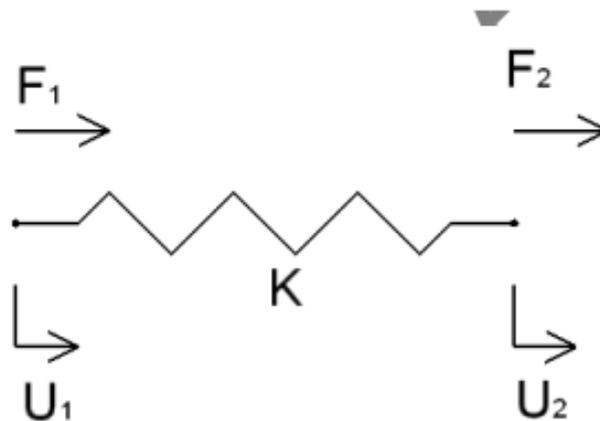


Figura 4 – Deslocamentos e forças nas extremidades de uma mola (AZEVEDO, 2016)

Após discretizar a geometria, o programa poderá então, durante a análise montar a equação matricial com os vetores e matriz de rigidez para calcular o deslocamento de cada um dos nós e as tensões naqueles pontos Figura 5. Quando um nó de elemento tiver mais de um grau de liberdade torna-se necessário o cálculo para cada grau de liberdade. (AZEVEDO, 2016).

$$\begin{Bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix}$$

Figura 5 – Equação matricial do sistema de dois elementos em série (AZEVEDO, 2016)

2.5.1 Análise da Malha no MEF

A malha representa a união das subdivisões dos elementos, logo a eficiência da malha dependerá da adaptação do refinamento feito. Esse refinamento depende de operações aritméticas, que são proporcionais ao elemento finito. A malha apresenta vários tipos de modelamento, em especial o triangular, o quadrilátero, hexaedros, entre outros (OWEN, 1998).

(MUTHUKRISHNAN; NAMBIAR; LAWRENCE, 1995) ressalta que a malha pode ser feita no corpo como um todo, superfícies menos complexas, não afetando significadamente o tempo de análise, porém em casos de superfícies complexas, deve-se fazer um refinamento daquela área específica, como curvas, interseção e descontinuidade.

A formação da malha se denomina discretização e na análise estrutural compreende a subdivisão dos objetos sejam peças ou conjuntos de peças em pequenas partes denominadas elementos (AZEVEDO, 2016).

No refinamento será definido as subdivisões dos elementos, por isso a escolha do refinamento adequado irá influenciar na qualidade da malha (GIL, 2015).

A geração automática da malha, não utiliza uma função aritmética complexa, apenas diminuir o tamanho da malha, geralmente é utilizada nesse caso o modelamento quadrilátero (LO; LEE, 1998).

Segundo (MUTHUKRISHNAN; NAMBIAR; LAWRENCE, 1995) superfícies curvas são as que mais necessitam de maior atenção no refinamento, apresentam vários tipos de análise e modelagem.

Após o refinamento, é estudado a sua subdivisão, essa é necessária apenas nos casos onde a razão do refinamento é maior do que 1.. Basicamente irá pegar o elemento de maior aresta, subdividi-lo e gerar um nó, em seguida pegar o elemento que agora apresenta maior aresta e repetir esse processo, isso é realizado sucessivamente até a relação de refinamento ser menor ou igual a 1, conforme necessário (MUTHUKRISHNAN; NAMBIAR; LAWRENCE, 1995).

2.5.2 Formato da Malha

A malha pode ser dividida em vários formatos, como apresentado na Figura 6, entre eles usualmente se destacam o formato triangular, tetraédrico, quadrilátero e hexaédrico. Cada formato tem suas especificações, métodos e peculiaridades. Pode agrupá-los em dois grupos, um grupo contendo os formatos triangular e tetraédrico, e outro grupo contendo os formatos quadrilátero e hexaédrico (OWEN, 1998).

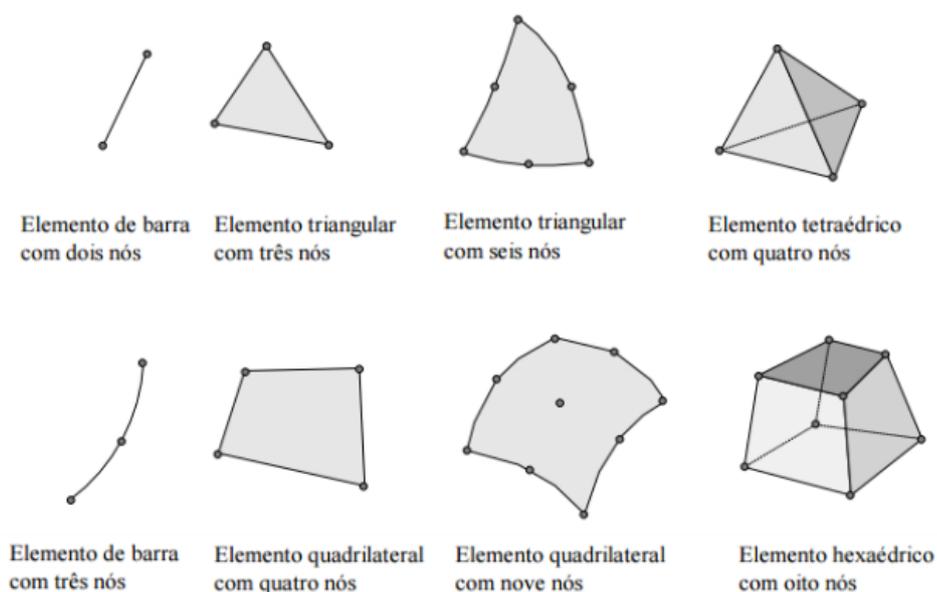


Figura 6 – Tipos de Elementos da Malha (SOUZA, 2003)

Os formatos triangular e tetraédrico, apresentam similaridade, mas o triangular é utilizado em figura 2D, e o tetraédro em figura 3D (OWEN, 1998).

2.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Sob o ponto de vista da física a compressão é o contrário da tração, e os efeitos observados por uma carga são também verificados pelo outro. As propriedades do material podem ser descobertas tanto por um quanto por outro e como o de tração é mais prático, não é necessário realizar o de compressão (ZOLIN, 2016).

O ensaio de compressão é o mais indicado para avaliar essas características, principalmente quando se trata de materiais frágeis, como ferro fundido, madeira, pedra e concreto. É também recomendado para produtos acabados, como molas e tubos (ALVES; NIELSEN; MARTINS, 2012).

No ensaio de compressão, assim como no de tração, um corpo submetido a compressão sofre uma deformação elástica e uma deformação plásticas (BOFF et al., 2012).

Na Figura 7, o corpo volta ao formato original quando é retirada a carga. É o caso dos elastômeros.

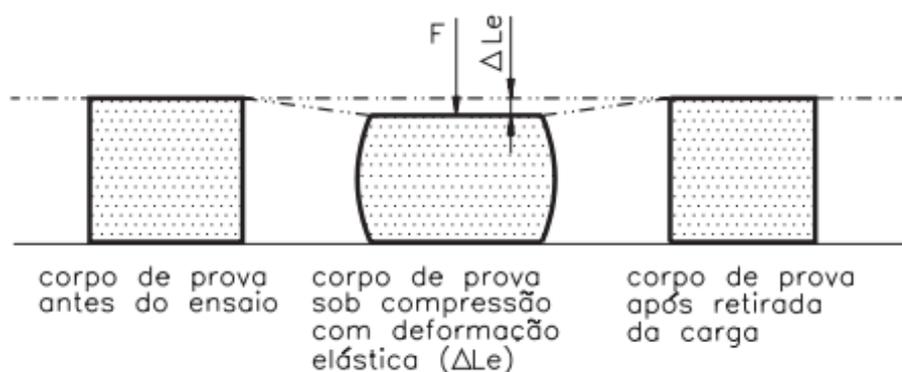


Figura 7 – **Deformação Elástica de um objeto submetido ao ensaio de compressão ()**

Nos ensaios de compressão, a lei de Hooke também vale para a fase elástica da deformação, e é possível determinar o módulo de elasticidade para diferentes materiais (COSSOLINO; PEREIRA, 2010b).

Ensaio de compressão com discos empilhados não tem recebido uma devida atenção da literatura (BOFF et al., 2012). Os trabalhos mais relevantes foram desenvolvidos por Merklein e Kuppert, que discutiam a utilização do ensaio de compressão com discos empilhados em materiais anisotrópicos (MERKLEIN; KUPPERT, 2009).

O Quadro 8 mostra, de forma resumida, as fórmulas para cálculo da tensão, deformação e do módulo de elasticidade.

RELAÇÕES VÁLIDAS PARA OS ESFORÇOS DE COMPRESSÃO	
FÓRMULA	SIGNIFICADO
$T = \frac{F}{S}$	T → tensão de compressão F → força de compressão S → área da seção do corpo
$\epsilon = \frac{L_o - L_f}{L_o}$	ϵ → deformação L _o - L _f → variação do comprimento do corpo L _o → comprimento inicial do corpo
$E = \frac{T}{\epsilon}$	E → módulo de elasticidade T → tensão ϵ → deformação

Figura 8 – Relação válidas para os esforços de compressão ()

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será relatado as etapas realizadas neste trabalho para se obter o objetivo geral.

O capítulo será dividido em três subcapítulos que são:

1 - Fabricação das Borrachas Sintéticas

Onde mostra como ocorreu a fabricação das borrachas sintéticas: tempo de mistura, tempo de cura, proporção da borracha sintética e catalisador, utilizadas no teste de compressão para determinar o módulo de elasticidade e assim iniciar a simulação.

2 - Teste de rampa - compressão

Teste utilizado para obter o módulo de elasticidade das borrachas sintéticas BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING® BX3-8001, teste de compressão do sistema encapsulado duplo e triplo (completo). Com os dados do teste de rampa do sistema encapsulado será possível validar ou não a simulação.

3 - Simulação computacional do sistema de amortecimento

Etapas para verificar o comportamento das borrachas no sistema encapsulado de forma computacional. Observar o que acontece dentro do sistema e se é semelhante ao teste de compressão realizado no sistema encapsulado.

3.1 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS DE TESTE

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados dois tipos de discos de silicone comerciais bi-componentes (BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING® BX3-8001) a cura de todos foi em temperatura ambiente de $25C \pm 5C$.

A escolha desses materiais também foi de acordo com os resultados da tese (OLIVEIRA, 2017) sobre a Muleta Canadense, que mostra que a combinação desses dois materiais com a geometria citada no parágrafo anterior tem um resultado melhor para o amortecimento na muleta canadense.

A geometria escolhida foi de acordo com os resultados da teste de (OLIVEIRA, 2017), o qual conclui que a melhor geometria para o melhor amortecimento seria com dois discos de 30mm e um disco de 25mm.

Os dois silicones escolhidos foram manipulados na forma líquida para a confecção dos discos. Para isso foram utilizados moldes bipartidos confeccionados com Poliacetal. A confecção dos discos foram realizados em três etapas de preparação do material base: preparação, moldagem, desmoldagem. A Figura 9 mostra o silicone na fase líquida no molde de Poliacetal.



Figura 9 – **Borracha de Silicone.** Borracha de silicone BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING® BX3-8001 no molde antes de completar o tempo de cura. Fonte própria

Para realizar a mistura correta para a preparação do composto de silicone, em fase líquida, adequada foi verificado no site do fabricante. A quantidade adequada para manipulação do silicone com seu catalisador em fase líquida é que para o BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B é de 50% do tipo A e 50% do tipo B, já o silicone DOW CORNING® BX3-8001 é de 95% de silicone para 5% de catalisador.

Para a dosagem adequada dos silicões de cada compostos base e do catalisador do BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B foi utilizada a seringa BD Plastipak 20 ml sem agulha, já para a dosagem do catalisador utilizado com o silicone DOW CORNING® BX3-8001 foi utilizada a seringa BD Plastipak 5ml com agulha. Após a medição com as seringas foi depositado os compostos no béquer graduado All Glass 50ml e pesagem conforme apresentado na Figura (10).



Figura 10 – **Borracha de Silicone.** Borracha de silicone BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING® BX3-8001 no molde antes de completar o tempo de cura

O silicone com o catalisador no béquer foram misturados por 40 segundos para homogeneizar a mistura, após isso foram depositados nos moldes dos discos até o preenchimento total da cavidade do molde. Para determinar a quantidade correta para este preenchimento o molde foi colocado em uma balança digital com precisão de 0,1g.

Após o tempo de cura foi medido do diâmetro do disco com o paquímetro analógico quadridimensional Mitutoyo de 150 mm e precisão de 0,05 mm e um micrômetro XXX para a validação do disco de $10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Após a cura total no período de 24h é feita a medição da dureza Shore A de cada disco para verificar se apresenta a dureza esperada após a cura total.

No Quadro 11, verifica-se as características mecânicas fornecidas pelo fabricante das borrachas sintéticas.

PASTILHA 2					
MATERIAL	BS - Platina Semi Cristal A / B				
Características	Borracha de silicone bi componente, com cura por platina a temperatura ambiente. atente e certificado de acordo com a ISO 10993-1 e USP Classe VI para biocompatibilidade				
DUREZA após 24 hs	12 Shore A				
Cor	Translúcido	VISCOSIDADE	A- 2500 cps /B 3500 cps a 23°C	DENSIDADE	1,08 g/ml a 25°C
ALONGAMENTO ATÉ RUPTURA	600%				
RESISTÊNCIA À RUPTURA	3,0 MPa				
RESISTÊNCIA AO RASGO	12 N/mm				
RETRAÇÃO LINEAR	Sem retração dimensional				
TEMPO DE CURA	1h a 23 °C				
PASTILHA 3					
MATERIAL	Dow Corning® BX3- 8001 Borracha Líquida de Silicone				
Características	Borracha Líquida de Silicone bicomponente, composto de base e catalisador, de média viscosidade, cura à temperatura ambiente.				
DUREZA após 24 hs	7-10 Shore A				
Cor	Branca a Creme	VISCOSIDADE	10.000 cps a 25°C	DENSIDADE	1.16 g/ml a 25°C
ALONGAMENTO ATÉ RUPTURA	400%				
RESISTÊNCIA À RUPTURA	1,73 MPa				
RESISTÊNCIA AO RASGO	6,13 N/mm				
RETRAÇÃO LINEAR	0,5%				
TEMPO DE CURA	2 h				

Figura 11 – **Características Mecânicas**. Quadro com informações referentes ao Silicone BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING® BX3-8001. Adaptado de (OLIVEIRA, 2017)

3.2 TESTE EM RAMPA - COMPRESSÃO - EXPERIMENTAL

O teste de compressão foi feito para se obter dados para complementar a simulação computacional.

Após a fabricação das borrachas sintéticas, no laboratório de Materiais da Faculdade do Gama na máquina de teste de tração foi realizado teste de compressão com rampa de 100 N/s das borrachas fabricadas em temperatura ambiente de 25 graus Celsius.

Foram realizados quatro tipos de teste de compressão,

Primeiro foi feito o teste individual de cada borracha em rampa de de 100 N/s, para se obter dados que possibilitem determinar o Módulo de Elasticidade das amostra ensaiadas dos dois compostos analisados e assim complementar a simulação e observar se há diferença nos valores com a diferenças das rampas. A Figura 12 mostra como foi realizado o teste de compressão.



Figura 12 – **Teste de Compressão.** Teste de Compressão em rampa de 100N/s

O segundo teste foi realizado com os dois tipos de borracha simultaneamente (BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING[®] BX3-8001), sobrepostas de 100 N/s, como é observado na Figura 13 para observar se a fase de cada uma influenciava na deformação e nos resultados experimentais. Permitindo a obtenção dos dados comparativos.



Figura 13 – **Teste de Compressão.** Teste de Compressão com as duas borrachas simultaneamente

O terceiro e o quarto teste foram realizados no sistema encapsulado para que fosse possível observar a convergência dos materiais em contato e no encapsulamento.

Após os testes de rampa é obtido o deslocamento em função da força e, a partir desses valores é realizado os cálculos para obter o modulo de elasticidade e de rigidez dos materiais.

$$E = \sigma / \xi \quad (5)$$

Com o teste experimental será possível obter dados comparativos que validem o modelo computacional.

3.3 SIMULAÇÃO NO SISTEMA ENCAPSULADO

Com o uso do software CAD CATIA foram elaborados modelos tridimensionais dos sistemas ensaiados, este recurso permite a utilização dos CADs criados no software ANSYS para criação de modelos de simulação de resposta computacional.

Sistema de teste de compressão no sistema encapsulado com as duas borrachas BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING.

Sistema de teste de compressão no sistema encapsulado com três borrachas (duas borrachas BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e uma DOW CORNING).

A figura Figura 14 mostra os CADs utilizados para realização das simulações.

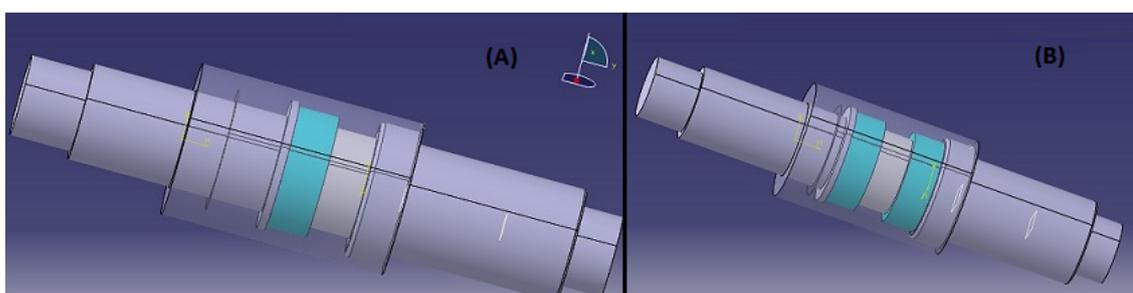


Figura 14 – CADs (A) sistema encapsulado com as duas borrachas. (B) sistema encapsulado com três borrachas

No total foram realizados seis simulações computacionais, com três cargas aplicadas diferentes (75N , 1250N e 5000N). Os dois primeiros valores foram escolhidos de acordo com o peso de pessoas do sexo masculino com dois biotipos, e o terceiro valor, 5000N, foi para analisar o sistema colocando uma carga extrema.

Com a simulação é possível realizar uma análise comparativa entre os ensaios experimentais e computacionais, com carga de 1250 N e a diferença do comportamento do sistema no software ANSYS com as outras duas cargas.

3.3.1 Pré Processamento

No pre processamento há a geometria, tipo de análise, malha, propriedades dos materiais e condições de contorno.

A geometria escolhida foi de acordo com a geometria realizada no teste de compressão. A borracha SEMI CRISTAL PLATINA BS tem 30 mm de diâmetro enquanto a borracha DOW CORNING tem 25 mm, ambas possuem 10 mm de altura. Foi utilizado o Structure no software ANSYS em uma geometria tridimensional.

As formas e tamanhos de cada elemento pode variar de acordo com o refinamento que foi utilizado na malha. A malha das simulações deste trabalho são de forma tetraédricos. A Figura 15 e a Figura 16 mostra as malhas dos dois sistemas de simulação utilizados.

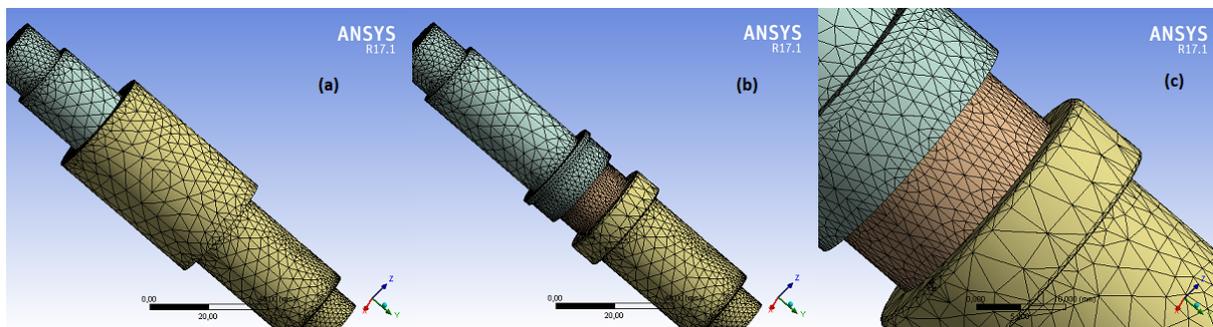


Figura 15 – Malha do sistema encapsulado, com duas borrachas.

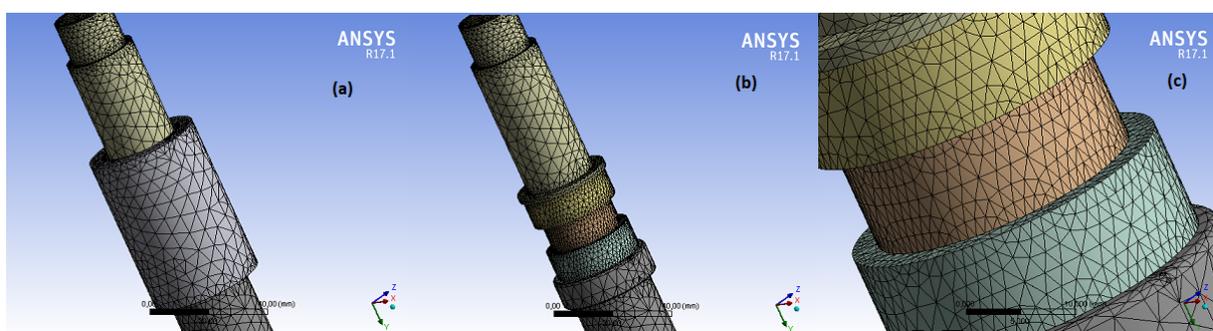


Figura 16 – Malha do sistema encapsulado completo, com três borrachas.

A malha completa do sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas há 56521 elementos e 93789 nós. A malha completa do sistema encapsulado completo há 60432 elementos e 101448 nós.

Em um software como ANSYS os cálculos são feito por métodos de elementos finitos, ou seja, haverá um calculo para cada nó do modelo. Para que a simulação tenha o valor mais próximo do calculo analítico foi realizado dois refinamentos na malha. O primeiro refinamento foi feito na parte metalica do sistema,refinamento de grau 1, já o segundo foi realizado nas borrachas sinteticas, refinamento de grau 2.

3.3.2 Análise Computacional

A analise Computacional foi realizado no ANSYS Workbench, com a geometria feita no CATIA V5.

No ANSYS o tipo de análise utilizado foi o *Static Structural*, nele foi inserida a geometria correspondente a simulação que seria realizada. A Figura 17 mostra a interface inicial do projeto do ansys.

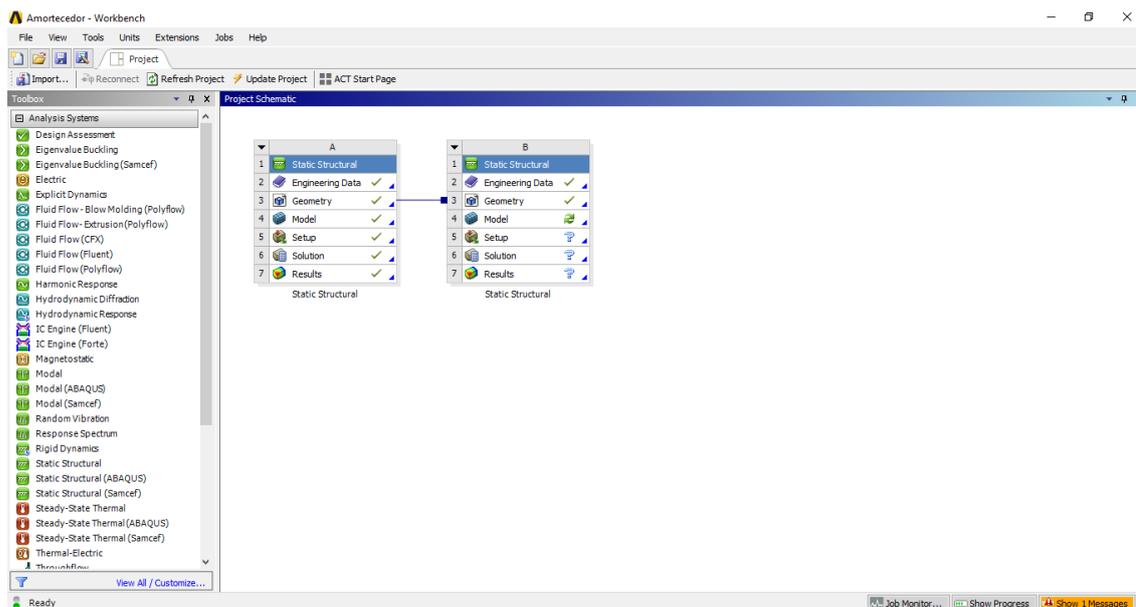


Figura 17 – Interface do software ANSYS Workbench

Na área de Engineering Data é onde se coloca os materiais a se utilizar na simulação. No caso das simulações foram usados as borrachas sintéticas utilizados nos testes de compressão e o alumínio e o material da estrutura mecânica de encapsulamento.

O fabricante das borrachas sintéticas não fornece dados completos da caracterização mecânica. Na simulação foi utilizado a densidade e dos dados da elasticidade dos materiais obtidos com após análises do teste de compressão realizados nas borrachas. O coeficiente de Poisson utilizado foi o padrão para borrachas sintéticas, 0,48.

Após editar os materiais que foram usados na simulação foi selecionado a geometria que seria analisada e assim pode-se iniciar a simulação no Ansys.

Os ensaios computacionais foram utilizados parâmetros de carga 750N, 1250N e 5000N na parte superior da estrutura de apoio e dividido em sub-etapas, a quantidade dessas sub-etapas foi parametrizadas de acordo com o tempo de teste experimental de compressão, 12 segundo no sistema duplo e 13 segundos no sistema completo.

Na parte inferior do objeto de apoio foi utilizada a restrição *Fixed Support*, para que a parte inferior ficasse fixa assim como no ensaio experimental.

4 RESULTADOS

4.1 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS

Foram confeccionadas 12 amostras borrachas BS PLATINA SEMICRISTAL A/B e 9 amostras borrachas DOW CORNING. A Figura 18 mostra as borrachas após a fabricação e tempo de curagem de 24 horas.

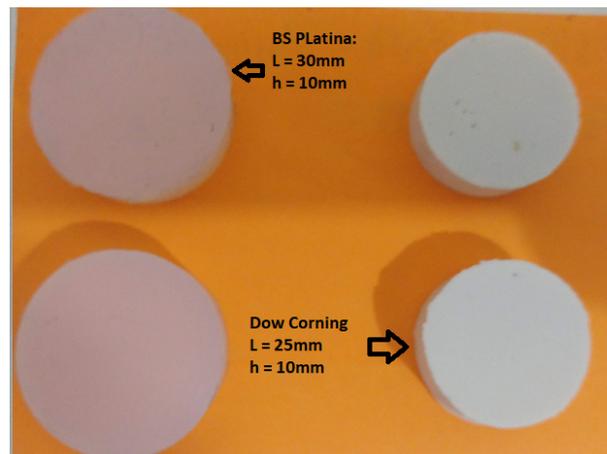


Figura 18 – Borrachas Sintéticas (a)BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B. (b) DOW CORNING. (AUTORIA PROPRIA)

A Tabla 2 é referente aos valores da Dureza Shore A das borrachas sintéticas que foram observados.

Tabela 2 – Valores da Dureza Shore A das borrachas Sintéticas (HA).

DOW CORNING	BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B
13	9
11,5	10,5
13,5	9
12,5	9,5
13	8
11,5	8,5

Com os valores obtidos de Dureza Shores A a média deles é de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da Dureza Shore A das borrachas Sintéticas (HA)

DOW CORNING	BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B
12,5	9,1

4.2 TESTE DE COMPRESSÃO

Com o teste de compressão das borrachas foi possível definir o módulo de elasticidade das duas borrachas sintéticas BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING. A Tabla 4 é a tabela referente aos valores do modulo de elasticidade da borracha sintética BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B e DOW CORNING.

Tabela 4 – Valores do Módulo de Elasticidade (PA) das borrachas sintéticas.

	DOW CORNING	BS PLATINA SEMI CRISTAL A/B
	168041,0497	157688,6624
	161869,5134	168276,6030
	187357,5134	164556,0651
	163582,4713	160649,9080
	175719,0522	178763,3121
	166230,9096	138756,9144
Média	170466,7516	161448,5775

Valores estes obtidos a partir dos valores referentes a deformação das borrachas sintéticas testadas e a força de compressão sobre elas. Com o valor da força e da área da borracha sintética analisada, se obtém o valor da tensão e assim obtem o grafico Tensão x Deformação da onde se obtem o módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade é obtido a partir da Equação 6.

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (6)$$

Os testes de compressão do sistema encapsulado com duas borrachas e sistema encapsulado completo é representado pelo Gráfico 19

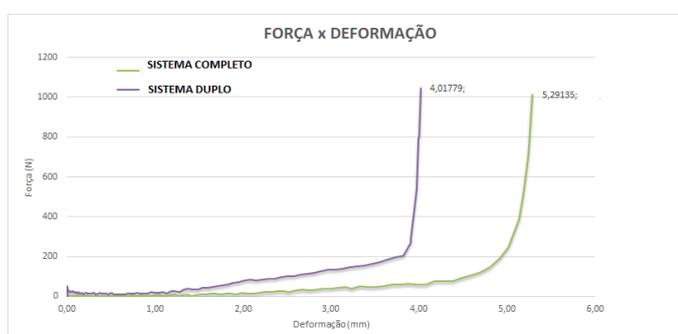


Figura 19 – Gráfico Força x Deformação dos sistemas encapsulados

Com a análise do gráfico 19 nota-se que ao atingir a carga de 200 N o sistema encapsulado duplo entra em estado de deformação ,praticamente, estacionário. A força aplicada

continua aumentando porém a deformação do sistema não acompanha. A diferença entre a deformação em 200 N e 1045 N é de apenas 5% (3,82008 a 200 N e 4,01779 a 1045 N)

O sistema encapsulado completo demora um pouco mais para entrar em um estado estacionário. Ao atingir uma força entre 250 N a 270N é que a deformação começa a ser pouco significativa em comparação com a força aplicada. Nota-se também que nesse sistema há uma curva significativa, e o estado estacionário demora um pouco mais há ocorrer em comparação com o sistema duplo, porém o valor da diferença entre as deformações dos dois sistemas são muito próxima se considerar a deformação onde se inicia o estado estacionário.

No sistema completo a diferença entre a deformação em 250 N e 1100 N é de aproximadamente 6%. Se considerar a partir de 200 N o valor da deformação é de 8%.

Isso provavelmente ocorre porque as borrachas sintéticas, no sistema, está se moldando de acordo com a área livre no encapsulamento.

4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Com a simulação foi possível observar a deformação das borrachas dentro do sistema encapsulado. A Figura 20 é referente a simulação realizado no ANSYS com carga de 750 N.

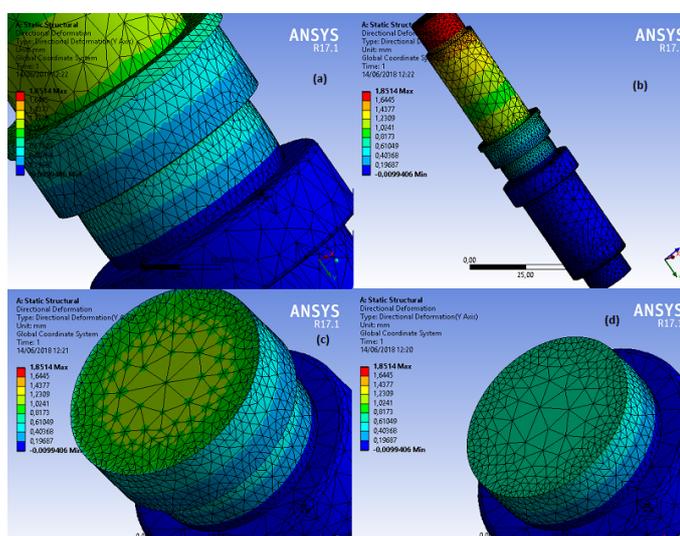


Figura 20 – **Simulação do sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas - 750N**
 Simulação do sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas (a) Deformação das duas borrachas do sistema. (b) O sistema encapsulado completo. (c) A deformação da borracha BS Platina na área de contato com o apoio. (d) A deformação da área de contato entre as duas borrachas

É possível observar que a deformação das borrachas ,na área de contato entre elas, é maior que nas extremidades. Por conta da pressão que ocorre entre a área de contato entre elas uma pode adentrar a outra. Isso também ocorre porque a borracha superior, BS PLATINA SEMI CRISTAL, não consegue se expandir nos eixos x e z por conta da parede do sistema encapsulado.

Na simulação referente a Figura 21 a força aplicada, 1250 N, foi a mesma que na análise experimental, com ela é possível notar se há semelhanças entre as análises. O comportamento das borrachas é semelhante a análise com 750N, porém a deformação é maior por conta da aplicação de maior força. Nessa simulação a face de contato entre as borrachas, principalmente da borracha sintética BS PLATINA SEMI CRISTAL, sofre uma deformação maior, enquanto a borracha sintética DOW CORNING expande no sentido das paredes do sistema encapsulado.

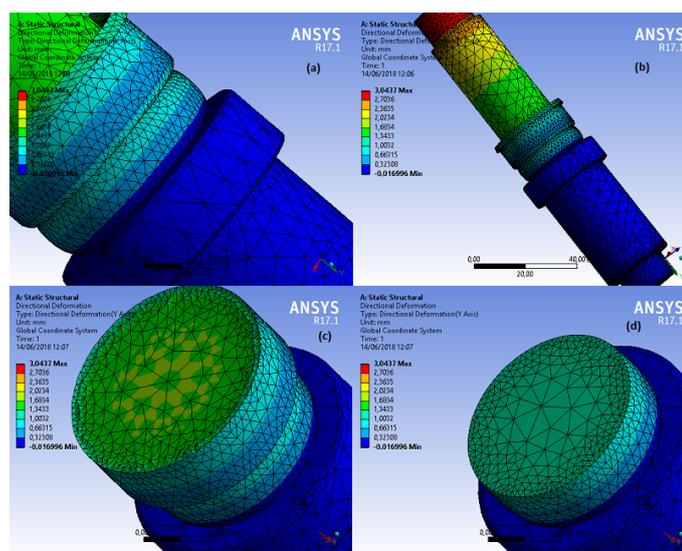


Figura 21 – **Simulação do sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas - 1250N** (a) Deformação das duas borrachas do sistema. (b)O sistema encapsulado completo. (c) A deformação da borracha BS Platina na área de contato com o apoio. (d) A deformação da área de contato entre as duas borrachas

A Figura 22 é referente a simulação realizado no ANSYS com carga de 5000 N.

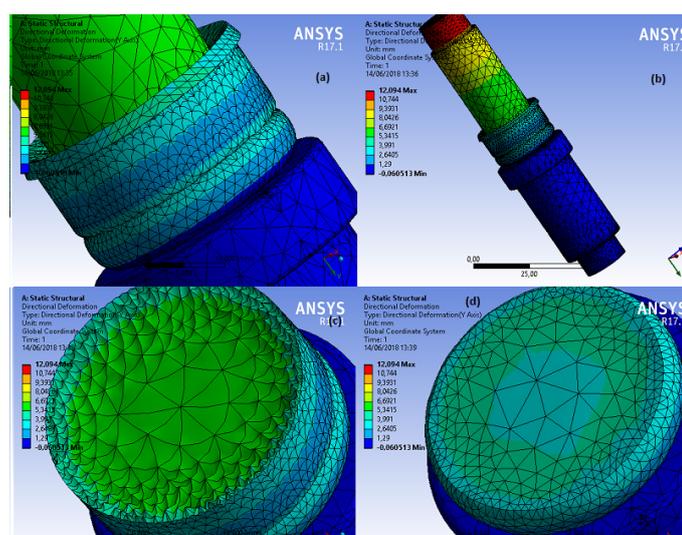


Figura 22 – **Simulação do sistema encapsulado com duas borrachas sintéticas - 5000N**. (a) Deformação das duas borrachas do sistema. (b)O sistema encapsulado completo. (c) A deformação da borracha BS Platina na área de contato com o apoio. (d) A deformação da área de contato entre as duas borrachas

A simulação com 5000 N foi realizada para avaliar o sistema encapsulado com uma carga extrema.

Nota-se que a deformação das borrachas aumenta de acordo com a força aplicada, e a deformação na área de contato também. Como a borracha inferior está em contato com uma área de dureza mais elevada e sem sofrer deformação a mesma se expande até atingir as paredes do sistema.

Com a simulação é possível observa o quanto apenas as borrachas se deformam em cada eixo do sistema. Na simulação os valores de deformação das borrachas no eixo y (sentido que é aplicado a força em Newtons), eixo x e eixo z, são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores da Deformação nos eixos x, y e z (mm) do sistema encapsulado duplo.

	750N	1250N	5000N
eixo x	0,4127	0,66551	2,4448
eixo y	1,0678	1,7687	6,4684
eixo z	0,42019	0,67772	2,4914

A Figura 23 mostra a simulação do sistema completo encapsulado, com três borrachas utilizando força de 750 N.

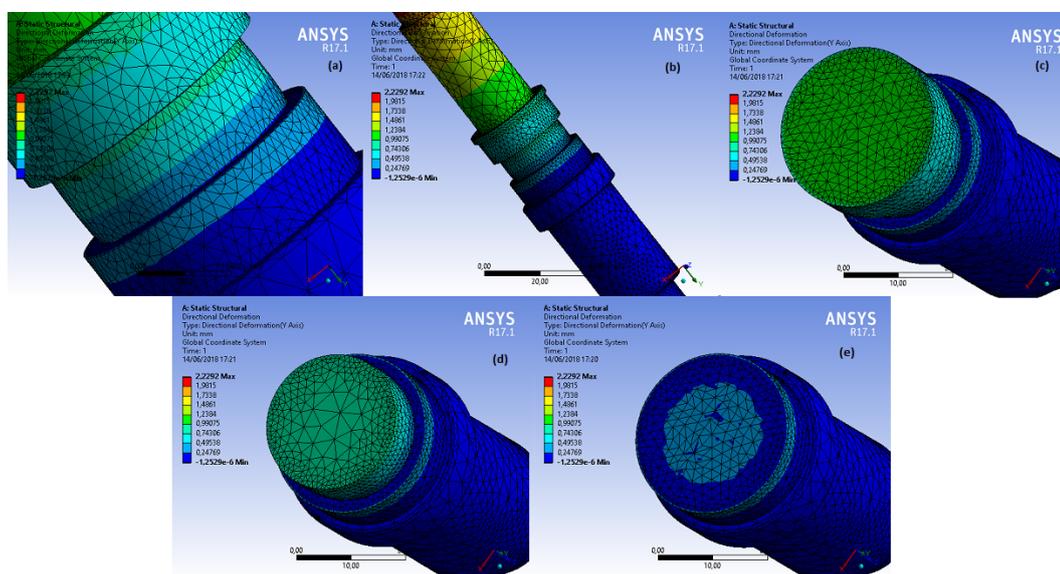


Figura 23 – **Simulação do sistema encapsulado completo - 750N.** (a)O sistema encapsulado completo. (b) A deformação da borracha BS Platina na área de contato com o apoio. (c) A deformação da área de contato entre a borracha BS PLATINA SEMICRISTAL A/B superior com a borracha DOW CORNING (d) A deformação da área de contato entre a borracha BS PLATINA SEMICRISTAL A/B superior com a borracha DOW CORNING. (e) A deformação das três borrachas em conjunto.

A Figura 24 mostra o sistema similar com o feito no teste de rampa, em função da força aplicada.

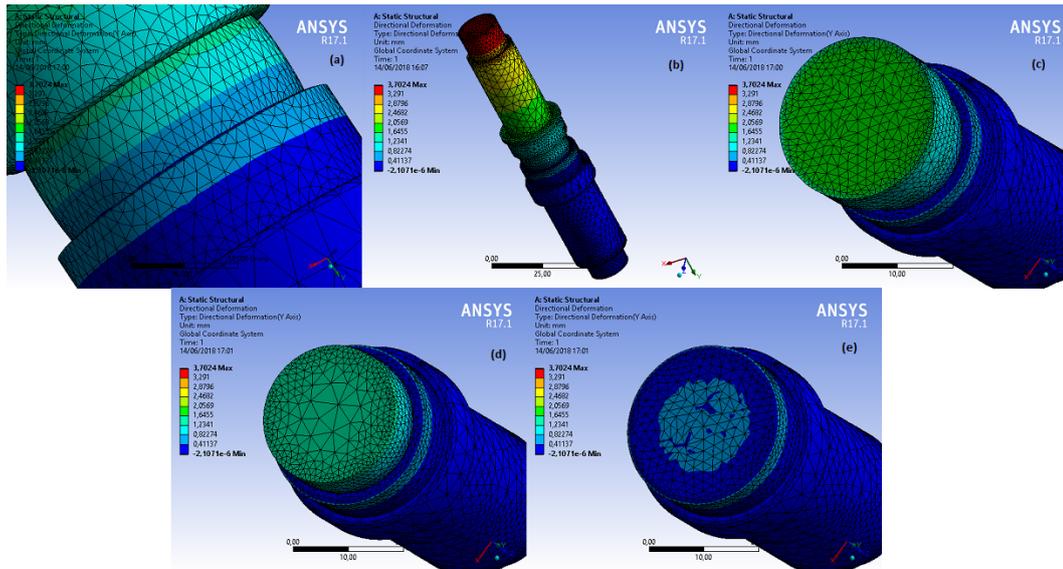


Figura 24 – **Simulação do sistema encapsulado completo - 1250 N.** (a)O sistema encapsulado completo. (b) A deformação da borracha BS Platina na área de contato com o apoio. (c) A deformação da área de contato entre a borracha BS PLATINA SEMICRISTAL A/B superior com a borracha DOW CORNING (d) A deformação da área de contato entre a borracha BS PLATINA SEMICRISTAL A/B superior com a borracha DOW CORNING. (e) A deformação das três borrachas em conjunto.

A Figura 25 mostra o sistema similar com o feito no teste de rampa, em função da força aplicada.

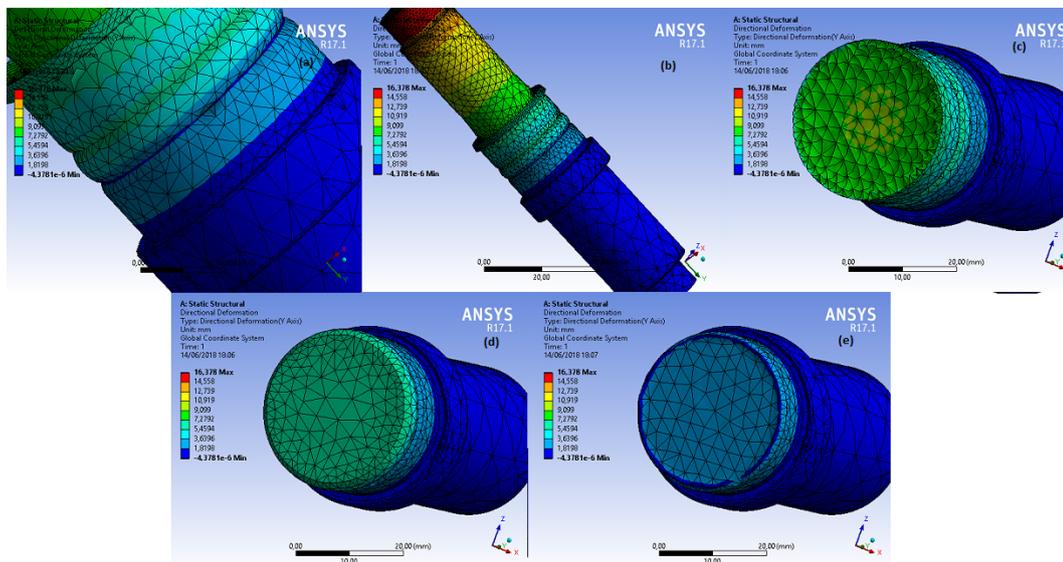


Figura 25 – **Simulação do sistema encapsulado completo - 5000N.** (a)O sistema encapsulado completo. (b) A deformação da borracha BS Platina na área de contato com o apoio. (c) A deformação da área de contato entre a borracha BS PLATINA SEMICRISTAL A/B superior com a borracha DOW CORNING (d) A deformação da área de contato entre a borracha BS PLATINA SEMICRISTAL A/B superior com a borracha DOW CORNING. (e) A deformação das três borrachas em conjunto.(Autoria - Propria

Com as três simulações é possível notar que a borracha sintética BS PLATINA SEMI-CRISTAL que se é a que menos se deforma, isso ocorre porque a força aplicada na extremidade do sistema se dissipa, e as borrachas superiores ao se deformarem vão ocupando os espaços vazios do sistema.

Na simulação os valores de deformação das borrachas no eixo y (sentido que é aplicado a força em Newtons), eixo x e eixo z, a Tabela 6.

Tabela 6 – Valores da Deformação nos eixos x, y e z (mm) do sistema completo.

	750N	1250N	5000N
eixo x	0,37418	0,61966	2,7295
eixo y	1,2191	2,0129	9,3590
eixo z	0,37587	0,62266	2,7122

Com a Tabela 6 nota-se uma diferença de deformação das borrachas significativas com o aumento de força. Isso ocorre porque as borrachas do sistema encapsulado vão perdendo área quando aplicado a no sistema. Com isso as borrachas se moldam de acordo com o espaço que há no sistema encapsulado. A borracha que se encontra no meio (DOW CORNING) acabar adentrando a borracha inferior (BS PLATINA SEMICRISTAL A/B).

Porém ao analisar a simulação, é possível concluir que a borracha superior que a que sofre mais deformação com o contato com a borracha DOW CORNING, porém a dissipação de força antes de chegar na área de contato entre a borracha DOW CORNING e a borracha BS PLATINA SEMICRISTAL inferior.

No Gráfico 26 mostra como foi o comportamento da deformação com 1250 N.

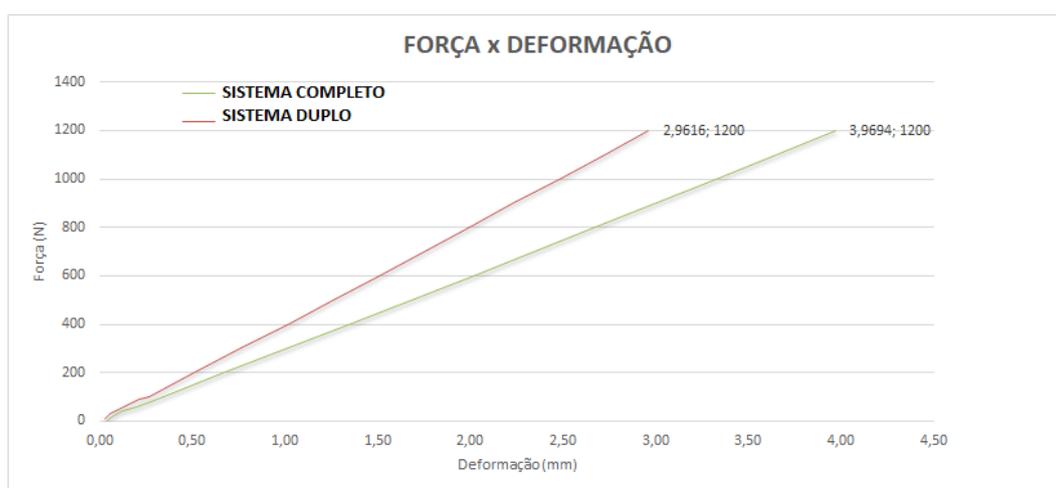


Figura 26 – Gráfico Força x Deformação dos sistemas simulados no ANSYS

Nota-se que a deformação ocorreu de maneira linear. Isso aconteceu porque a simulação foi alimentada apenas com as características elásticas das borrachas sintéticas e suas densidades.

5 CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados experimentais e computacionais é possível notar uma discrepância entre eles.

Na análise computacional a deformação ocorre de maneira linear, o que não seria possível ao se analisar o experimental. Esse erro provavelmente ocorre porque a simulação foi alimentada apenas com as características mecânicas elásticas das borrachas sintéticas.

Para melhor analisar o sistema de maneira computacional (com a análise no ANSYS) é necessário mais informações dos materiais, como a plasticidade e a tenacidade.

Com os dados da plasticidade e da tenacidade das borrachas sintéticas é possível realizar uma nova simulação e determinar se é válida ou não. Para melhor validar a simulação computacional é necessário determinar o coeficiente de segurança das borrachas, para assim determinar qual biotipo a configuração atende.

A caracterização completa das borrachas também é necessária porque há discrepâncias nos dados fornecidos pelo fabricante, como o valor da dureza Shore A, e dados encontrados neste trabalho e em outros já realizados.

Para trabalhos futuros:

- Caracterização mecânica completa das borrachas sintéticas.
- Validação da análise, se ocorre o amortecimento multifásico.
- Validação do modelo para o melhor amortecimento de acordo com o biotipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L. M. M.; NIELSEN, C. V.; MARTINS, P. A. irme. Ensaio de compressão com discos empilhados. In: *31st SENAFOR-International Conference of Forging*. [S.l.: s.n.], 2012.
- AUGAT, P. et al. Early, full weightbearing with flexible fixation delays fracture healing. *Clinical orthopaedics and related research*, LWW, v. 328, p. 194–202, 1996.
- AZEVEDO, Á. F. Método dos elementos finitos. 2011.
- AZEVEDO, D. F. d. O. Isbn: .. 2016.
- BARLOW, F. W. *Rubber compounding: principles, materials, and techniques*. [S.l.]: M. Dekker, 1988.
- BLAIR, I. et al. *Movimento funcional humano: mensuração e análise*. [S.l.]: São Paulo: Manole, 2001.
- BOFF, U. et al. Ensaio de compressão é adequado para obter curvas de escoamento em chapas finas. *Corte & Conformação de Metais, São Paulo: Aranda Editora*, n. 81, p. 76–87, 2012.
- CAPECCI, D. et al. Crutch tip for swing-through crutch walking control based on a kinetic shape. In: IEEE. *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2015 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 612–617.
- CARPENITO, L. J. Diagnósticos de enfermagem: aplicação à prática clínica. In: *Diagnósticos de enfermagem: aplicação à prática clínica*. [S.l.: s.n.], 2002.
- COOK, R. D. *Finite element modeling for stress analysis*. [S.l.]: Wiley, 1994.
- COOK, R. D. et al. *Concepts and applications of finite element analysis*. [S.l.]: Wiley New York, 1974. v. 4.
- COOK, R. D. et al. *Concepts and applications of finite element analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- COPPOLA, J.; BRADT, R. Thermal-shock damage in sic. *Journal of the American Ceramic Society*, Wiley Online Library, v. 56, n. 4, p. 214–218, 1973.
- COSSOLINO, L.; PEREIRA, A. Amortecimento: classificação e métodos de determinação. *Universidade de São Carlos*, 2010.
- COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. *Informativo Técnico Científico. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/artigos/RT03-ATCP.pdf>*, 2010.
- DIETERLE, R.; BACHMANN, H. Experiments and models for the damping behaviour of vibrating reinforced concrete beams in the uncracked and cracked conditions. *Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, Bericht*, n. 119, 1981.
- FERRY, J. D. *Viscoelastic properties of polymers*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1980.

- FRANKOVICH, D. *The basics of vibration isolation using elastomeric materials*. [S.l.]: Society of Manufacturing Engineers, 2000.
- GHELLER JORDAO, I. Avaliação do isolamento de vibrações por elastômeros.
- GIL, F. d. S. L. *Análise da qualidade de malha de elementos finitos e validação de situação de caso real de viga biapoiada*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- GLISOI, S. F. d. N. et al. Dispositivos auxiliares de marcha: orientação quanto ao uso, adequação e prevenção de quedas em idosos. *Geriatrics, Gerontology and Aging*, Geriatrics, Gerontology and Aging, v. 6, n. 3, p. 261–272, 2012.
- JR, S. V. C. Ciência dos polímeros. *Artiber editora, São Paulo*, 2002.
- LAZAN, B. J. Damping of materials and members in structural mechanics. *PERGAMON PRESS LTD, OXFORD, ENGLAND*. 1968, 317, 1968.
- LO, S.; LEE, C. Selective regional refinement procedure for adaptive finite element analysis. *Computers & structures*, Elsevier, v. 68, n. 4, p. 325–341, 1998.
- MERKLEIN, M.; KUPPERT, A. A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. *International Journal of Material Forming*, Springer, v. 2, n. 1, p. 483, 2009.
- MUTHUKRISHNAN, S.; NAMBIAR, R.; LAWRENCE, K. Refinement of 3d meshes at surface intersections. *Computer-Aided Design*, Elsevier, v. 27, n. 8, p. 637–645, 1995.
- OLIVEIRA, J. H. de. *PROPOSTA DE AMORTECIMENTO ADAPTÁVEL PARA MULETA CANADENSE*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Brasília, Junho 2017.
- OWEN, S. J. A survey of unstructured mesh generation technology. In: *IMR*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 239–267.
- RESENDE, É.; GUIMARÃES, I. M.; MIRANDA, I. D. B. A. Treinamento de descarga de peso parcial na marcha em uso de dispositivos de auxílio. 2008.
- ROCHA, E. da. *Tecnologia de transformação dos elastômeros*. [S.l.]: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI, 2003.
- ROGERS, E. *Analysis of force distribution on upper body limbs during ambulation with crutches*. Tese (Doutorado) — University of Toronto (Canada), 2014.
- SILVA, C. W. D. *Vibration damping, control, and design*. [S.l.]: CRC Press, 2007.
- SORIANO, H. L.; LIMA, S. D. S. *Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas Vol. 48*. [S.l.]: EdUSP, 2003.
- SOUSA, D. S. S. et al. Análise clínica da marcha exemplo de aplicação em laboratório de movimento.
- SOUZA, R. M. de. O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. *Apostila, Universidade Federal do Pará, Belém*, 2003.

TONNESEN, T.; TELLE, R. Thermal shock damage in castables: Microstructural changes and evaluation by a damping method. In: GÖLLER. *CFI. Ceramic forum international*. [S.l.], 2007. v. 84, n. 9.

ZOLIN, I. Ensaio mecânicos e análises de falhas. 2016.