



ipb

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

**Prototipagem e modelação de sistema de suspensão semi-
activa para uma bicicleta BTT**

Gabriel Morais Nicomélio

Dissertação final apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial - Ramo de Engenharia Mecânica

Trabalho realizado sob a orientação de

Doutor Manuel Teixeira Braz César

Doutor José Gonçalves

Novembro 2016

**Prototipagem e modelação de sistema de suspensão semi-
activa para uma bicicleta BTT**

Gabriel Morais Nicomélio

Dissertação final apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial - Ramo de Engenharia Mecânica

Trabalho realizado sob a orientação de

Doutor Manuel Teixeira Braz César

Doutor José Gonçalves

Novembro 2016

" A nossa recompensa esta no esforço , não no resultado. Um esforço total é uma vitória completa."

Gandhi

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento aos meus orientadores, Dr. Manuel Teixeira Braz César e Dr. José Gonçalves, por toda a disponibilidade e por repartir os seus conhecimentos durante o acompanhamento da dissertação.

Ao Instituto Politécnico de Bragança pela formação obtida na área de Engenharia Industrial -Ramo de Engenharia Mecânica.

À minha família, por ter criado condições para que eu pudesse realizar um dos meus sonhos, a minha formação, que sempre me ajudaram e deram força para tal.

Aos meus amigos e a minha namorada que sempre me ajudaram, apoiaram e me encorajaram durante esta etapa para conseguir alcançar os meus objectivos.

Por fim, agradecer ao Arlindo Pascoal, ao Sr. Abílio e ao Dr. Jorge Santo por toda a ajuda e disponibilidade.

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo principal o desenvolvimento e análise de um sistema semi-activo para redução de vibrações em suspensões de bicicletas BTT com suspensão integral utilizando um amortecedor magneto-reológico (MR).

Numa primeira fase será feita a construção de um protótipo da suspensão, o qual foi implementado na bicicleta BTT. De seguida a bicicleta foi instrumentada para a obtenção de dados (valores experimentais) numa configuração passiva.

Posteriormente foi elaborado um modelo numérico para simular o comportamento da suspensão com o amortecedor MR já implementado. O amortecedor MR, incorporado no sistema de suspensão traseira da bicicleta, será utilizado numa configuração passiva.

Com base neste modelo será feito um conjunto de simulações numéricas de forma a avaliar o comportamento da suspensão.

Na fase final serão apresentadas e discutidas as principais conclusões do estudo elaborado. Serão também indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Amortecedor MR; Configuração passiva; Modelo numérico.

Abstract

This work has as main objective the development and analysis of a semi-active system to reduce vibrations mountain bike bicycle suspension with full suspension using a magneto-rheological damper (MR).

In a first step the construction of a prototype of the suspension is collected, which was implemented in BTT bicycle. Then the bike was instrumented for data collection (experimental values) in a passive configuration.

Later it was developed a numerical model to simulate the behavior of suspension with MR damper already implemented. The MR damper incorporated into the rear bicycle suspension system, will be used in a passive configuration.

Based on this model will be a set of numerical simulations to assess the behavior of the suspension.

In the final phase will be presented and discussed the main findings of the detailed study. They will also be given some suggestions for future work.

Keywords: MR Damper; passive configuration; Numerical model.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas.....	xiv
Lista de Símbolos	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Objectivos	3
1.2. Descrição da dissertação	3
2.1. Sistemas de suspensão automóvel	4
2.2. Tipo de suspensão existentes	5
2.3. Sistema de suspensão semi-activa	9
2.4. Fluido Magneto-reológico	10
2.4.1. Princípio de funcionamento	11
2.4.2. Composição.....	14
2.4.3. Modos de funcionamento	14
2.5. Amortecedores Magnéto-Reológicos.....	17
2.5.1. Funcionamento	17
2.5.2. Construção de amortecedores MR	18
2.5.3. Geometria	19
2.5.4 Aplicações	21
3.2. Parte Electrónica	31
4. Dados experimentais.....	35
4.1. Resultados obtidos	36
4.1.1. Piso irregular (Paralelo)	36
4.1.2. Piso liso	40
5. Modelo Numérico da Bicicleta.....	44
5.1. Equações de Equilíbrio	45

5.2. Espaço de estado	47
5.3. Simulação do comportamento dinâmico do sistema.....	50
5.4. Resultados obtidos	51
6. Conclusões e trabalhos futuros	60
6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	61
Referências Bibliográficas.....	62
Anexos.....	65
Anexo 1 - Desenhos definição.	66

Lista de Figuras

Figura 1 - Suspensão Mac Pherson (Freitas, 2006) (Sleiman, 2010)	6
Figura 2 - Braços articulados sobrepostos (Sleiman, 2010).	6
Figura 3 - Suspensão Multilink (Lima, 2010) (Sleiman, 2010).	7
Figura 4 - Barras de ancoragem (Sleiman, 2010).	8
Figura 5 - Configuração da suspensão de Dion (Freitas, 2006).	8
Figura 6 - Fluido no estado normal (esquerda) e submetido a um campo magnético (direita) (Crivellaro, 2008).	10
Figura 7 - Etapas de funcionamento do fluido MR (Sleiman, 2010).	12
Figura 8 - Tensão de corte VS razão de deformação para fluidos MR com diferentes campos magnéticos (Neto, 2008).	13
Figura 9 - Modo válvula (Lima, 2011).	15
Figura 10 - Amortecedor construído em modo válvula (Costa, 2008).	15
Figura 11 - Modo de corte ou directo (Lima, 2011).	16
Figura 12 - Amortecedor construído em modo corte (Costa, 2008).	16
Figura 13 - Modo de esmagamento ou aperto (Lima, 2011).	17
Figura 14 - Dispositivo construído com o modo esmagamento (Costa, 2008).	17
Figura 15 - Vista em corte e representação do princípio de funcionamento de um amortecedor MR (modo válvula) (Sleiman, 2010).	18
Figura 16 - Geometria monotubo com funcionamento válvula (esquerda) e modo corte (direita) (Sleiman, 2010).	20
Figura 17 - Amortecedor MR de tubo duplo (Sleiman, 2010).	20
Figura 18 - Amortecedor MR de haste dupla (modo corte) (Sleiman, 2010).	21
Figura 19 - Esquema de instalação de um amortecedor MR num assento de veículos pesados (Sleiman, 2010).	22
Figura 20 - Suspensão convencional (esquerda) vs suspensão activa (direita) (Bombard, 2005).	22
Figura 21 - Esquema de um edifício com actuadores MR (Crivellaro, 2008).	23
Figura 22 - Ponte atirantada sobre o lago Dongting e pormenor de um actuador colocado nos tirantes (Crivellaro, 2008).	24
Figura 23 - Próteses semi-activas MR (Crivellaro, 2008).	24

Figura 24 - Prótese de perna mecânica Magnetix de MOTHEC baseados em actuadores MR (Crivellaro, 2008).....	25
Figura 25 - Exemplo de uso de amortecedores MR em máquinas de lavar (Crivellaro, 2008).....	25
Figura 26 - Amortecedor MR modelo RD-1005-3.....	26
Figura 27 - Bicicleta com suspensão integral.....	26
Figura 28 - Batente superior (esquerda) e batente inferior (direita).....	27
Figura 29 - Casquilho.....	27
Figura 30 - Veio dianteiro (esquerda) e veio traseiro (direita).....	28
Figura 31 - Anilha.....	28
Figura 32 - Teste na prensa hidráulica.....	29
Figura 33 - Assemblagem final.....	29
Figura 34 - Dimensões do protótipo.....	30
Figura 35 - Aplicação do amortecedor MR.....	30
Figura 36 - Arduíno Mega2560.....	31
Figura 37 - Acelerómetro adxl335.....	32
Figura 38 - Sensor de temperatura.....	32
Figura 39 - Sensor ACS714.....	32
Figura 40 - Sensor US1881.....	33
Figura 41 - Botão On/Off.....	33
Figura 42 - Sensores ligados ao Arduíno MEGA2560.....	34
Figura 43 - Bicicleta instrumentada.....	34
Figura 44 - Computador portátil e sistema de aquisição de dados.....	35
Figura 45 - Simulações efectuadas.....	36
Figura 46 - Vibrações no manípulo da bicicleta.....	37
Figura 47 - Vibrações nos pedais da bicicleta.....	38
Figura 48 - Vibrações no assento da bicicleta.....	39
Figura 49 - Vibrações no manípulo da bicicleta.....	40
Figura 50 - Vibrações nos pedais.....	41
Figura 51 - Vibrações no assento.....	42
Figura 52 - Bicicleta com suspensão integral e amortecedor MR.....	44
Figura 53 - Modelo da bicicleta.....	44
Figura 54 - Modelo em Simulink.....	50
Figura 55 - Excitação para simular um piso de estrada irregular.....	51

Figura 56 - Deslocamento na roda da frente.....	51
Figura 57 - Deslocamento na roda de traz.....	52
Figura 58 - Deslocamento na frente do quadro.....	53
Figura 59 - Deslocamento na traseira do quadro.....	54
Figura 60 - Velocidade na roda da frente.....	55
Figura 61 - Velocidade na roda de traz.....	56
Figura 62 - Velocidade na frente do quadro.....	57
Figura 63 - Velocidade na traseira do quadro.....	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características dos fluidos MR e ER (Kotinda & Júnior, 2003).	11
Tabela 2 - Acelerações máximas e mínimas.	37
Tabela 3 - Acelerações máximas e mínimas nos pedais.....	38
Tabela 4 - Acelerações máximas e mínimas no assento.....	39
Tabela 5 - Acelerações máximas e mínimas no manipululo.	41
Tabela 6 - Acelerações máximas e mínimas nos pedais.....	42
Tabela 7 - Acelerações máximas e mínimas no assento da bicicleta.	43
Tabela 8 - Deslocamentos máximos e mínimos na roda da frente da bicicleta.	52
Tabela 9 - Deslocamentos máximos e mínimos na roda traseira da bicicleta.	53
Tabela 10 - Deslocamentos máximos e mínimos na frente do quadro.....	54
Tabela 11 - Deslocamentos máximos e mínimos na traseira do quadro da bicicleta.	55
Tabela 12 - Velocidade máximas e mínimas na roda da frente.....	56
Tabela 13 - Velocidade máximas e mínimas na roda traseira.	57
Tabela 14 - Velocidades máximas e mínimas na parte da frente do quadro.	58
Tabela 15 - Velocidades máximas e mínimas na traseira do quadro da bicicleta.	59

Lista de Abreviaturas

MR - Magnético-reológico;

ER - Electro-reológico;

H - Força do campo magnético;

PWM - Modulação por largura de pulso;

I_b - Momento de inércia;

m_{wf} - Massa da roda da frente;

m_{wr} - Massa da roda traseira;

X_b - Deslocamento vertical;

x_{bf} - Deslocamento vertical onde se encontra a suspensão dianteira;

x_{br} - Deslocamento vertical onde se encontra a suspensão traseira;

x_{wf} - Deslocamento vertical da roda dianteira;

x_{wr} - Deslocamento vertical da roda traseira;

f_f - Força da suspensão dianteira;

f_r - Força da suspensão traseira;

L - Comprimento da bicicleta;

K_{wf} - Rigidez da roda da frente;

K_{wr} - Rigidez da roda traseira

K_{bf} - Rigidez do quadro onde se encontra a suspensão dianteira;

K_{br} - Rigidez do quadro onde se encontra a suspensão traseira;

c_{bf} - Constante de amortecimento dianteiro;

c_{br} - Constante de amortecimento traseiro.

Lista de Símbolos

τ - Tensão de corte;

ν - Viscosidade;

$\dot{\gamma}$ - Razão de deformação;

τ_y - Tensão de escoamento;

Θ_0 - Rotação angular;

1. Introdução

Em diversas aplicações de engenharia é frequente a necessidade de controlar as vibrações de diferentes sistemas mecânicos de forma a minimizar o seu efeito no desempenho dos sistemas bem como melhorar o conforto dos operários e utilizadores dos mesmos. Existem três grandes grupos de sistemas de controlo para atenuar os efeitos causados por vibrações indesejadas, são eles os sistemas de controlo activo, passivo e semi-activo.

Os sistemas de controlo passivo são os sistemas mais simples e económicos uma vez que não necessitam de uma fonte de energia externa, actuando directamente com as propriedades físicas (massa, rigidez e amortecimento) dos sistemas. Contudo, os sistemas de controlo passivo só conseguem actuar numa banda de frequências muito restrita. Para contornar tal limitação foram propostos os sistemas de controlo activo.

Os sistemas de controlo activo permitem o controlo de vibrações de diversas frequências através da utilização de actuadores, sensores e sistemas de controlo. A utilização destes componentes pode requerer uma elevada quantidade de energia, o que geralmente obriga a presença de uma fonte de energia externa. Contudo, os sistemas de controlo activo tornam-se muito dispendiosos devido à necessidade de uma fonte de energia externa, surge então a necessidade de um sistema que funcionem nas diversas frequências e sem necessidade de uma fonte de energia externa. A solução para este problema é encontrada nos sistemas controlo semi-activo.

Os sistemas de controlo semi-activo combinam características dos dois sistemas referidos anteriormente, tal como os sistemas de controlo passivo, a força de controlo é gerada através da dissipação da energia do sistema, contudo, a intensidade da força pode ser controlada através de corrente eléctrica com baixa potência e baixos níveis de tensão. Assim o sistema é capaz de actuar numa maior gama de frequências do que os sistemas de controlo passivo e com um custo inferior aos sistemas de controlo activo. É de referir também que possuem maior fiabilidade, uma vez que na falta de energia o sistema comporta-se como um sistema passivo.

Os sistemas de controlo de vibrações aplicados em suspensões de bicicletas baseiam-se essencialmente na utilização de amortecedores passivos que são projectados para cada

tipo de utilização e para as características da bicicleta. Dada a sua natureza passiva, estes sistemas não permitem alterações significativas do seu comportamento em função do tipo de pavimento ou do nível de desempenho desejado de forma a melhorar o conforto do ciclista. Neste contexto, os sistemas de controlo semi-activo baseados em amortecedores MR constituem uma metodologia inovadora para o controlo de vibrações que permite melhorar substancialmente o desempenho das bicicletas em qualquer situação.

Em destaque encontram-se os sistemas de suspensão com controlo semi-activo à base de fluidos magneto-reológicos. Isto é, o amortecedor tradicional é substituído por um amortecedor MR em que as propriedades reológicas são alteradas em função do campo magnético a que é submetido.

1.1. Objectivos

- Pretende-se estudar o desempenho de um sistema semi-activo utilizando um amortecedor MR para controlar as vibrações numa bicicleta BTT;
- Analisar o princípio de funcionamento do amortecedor;
- Elaboração do protótipo;
- Implementar o amortecedor MR na bicicleta;
- Desenvolvimento de um modelo numérico que permite simular o comportamento do amortecedor MR.

1.2. Descrição da dissertação

Nesta secção será feita uma breve descrição da dissertação, esta está dividida em 7 capítulos distribuídos da seguinte forma:

Capítulo 1: é feita uma pequena introdução sobre os pontos fundamentais do tema abordado e são apresentados os objectivos para a elaboração do trabalho.

Capítulo 2: é apresentado o estado da arte que começa por abordar os sistemas de suspensão semi-activa, fluidos magnéticos-reológicos, o seu princípio de funcionamento, o seu modo de funcionamento e a sua composição. Neste capítulo também vai ser abordado o funcionamento dos amortecedores MR, como fazer amortecedores MR de alto desempenho, tipos de geometria e por fim alguns exemplos onde se aplicam amortecedores MR.

Capítulo 3: neste capítulo vão ser abordadas as construções efectuadas para a elaboração de um protótipo (sistema de suspensão para uma bicicleta), tanto a nível mecânico como a nível eléctrico.

Capítulo 4: são retirados dados experimentais através de várias simulações efectuadas com a bicicleta e apresentados os resultados obtidos.

Capítulo 5: apresenta-se um modelo numérico desenvolvido da bicicleta, são apresentadas as equações de equilíbrio, o espaço de estado e por fim são apresentados os resultados obtidos.

Capítulo 6: neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre o trabalho elaborado e indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

2.1. Sistemas de suspensão automóvel

Os sistemas de suspensão existem de quando o único meio de transporte era o de tracção animal, bem antes do surgimento do primeiro automóvel. Inicialmente, os veículos de tracção animal não possuíam qualquer tipo de suspensão o que permitia a passagem de todas as vibrações e choques do contacto das rodas com o solo para os passageiros e para a carga transportada.

Tornou-se então necessário a introdução de um sistema que permitisse atenuar essa transmissão. O sistema começou por ser basicamente uma mola, e só mais tarde foi adicionado um amortecedor (Merling, 2007).

Por volta dos anos 30, os automóveis eram equipados com um sistema de suspensão com baixo amortecimento, o que permitia um excelente conforto para os passageiros mas não possuía estabilidade suficiente para uma condução em segurança.

Com a evolução dos automóveis e com o surgimento de veículos mais rápidos e potentes surgiu a necessidade de criar sistemas de suspensão que tivessem em conta também a estabilidade e a segurança, e não apenas o conforto dos passageiros (Crivellaro, 2008).

Assim, actualmente, um sistema de suspensão automóvel deve ser capaz de:

- Isolar os passageiros e carga de vibrações e de choques, permitindo assim o conforto dos passageiros e a segurança da carga transportada, através da absorção dos choques e do amortecimento das vibrações causadas pelas irregularidades dos pisos;
- Garantir a estabilidade e o controlo do veículo, conservando a posição longitudinal e transversal paralela ao plano em que se desloca, assim como manter todos os pneus em contacto com a superfície do piso.

Apesar dos sistemas de suspensão terem de ser capazes de desempenhar as funções anteriores, é de referir que cada sistema de suspensão automóvel é projectado de acordo com o tipo de operação a que se destina o automóvel. Um automóvel desportivo necessita ter um sistema de suspensão que permita um melhor controlo do veículo,

garantindo uma boa aderência à pista e permitindo um bom desempenho em manobras bruscas, não havendo tanta preocupação com o conforto, ao contrario dos veículos de transporte de pessoas que optam por um maior conforto, o que diminui o desempenho do mesmo em situações de manobras bruscas (Crivellaro, 2008).

A inabitabilidade destes sistemas face ao tipo de condução ou perfil do pavimento deve-se ao facto dos veículos convencionais usarem um sistema de controlo passivo, que são os mais simples e baratos, mas que não permitem modificar o seu modo de operação de forma a permitir os diferentes tipos de condução. Este problema pode ser contornado com a utilização de sistemas de controlo activo ou sistemas de controlo semi-activo (Paschoal, 2011).

2.2. Tipo de suspensão existentes

São diversos os tipos de suspensão existentes actualmente. O sistema de suspensão de um automóvel é diferenciado quanto à sua localização no eixo dianteiro ou traseiro do automóvel.

Independentemente dessa localização são divididos em dois tipos: sistemas de suspensão independente e sistema de suspensão de eixo rígido. Contudo, no eixo dianteiro é mais usado o sistema independente e no eixo traseiro o sistema de eixo rígido (Lima, 2014) (Sleiman, 2010).

Nos sistemas de suspensão independente não existe qualquer ligação entre as rodas do mesmo eixo e encontram-se neste grupo os seguintes tipos de suspensão:

- Mac Pherson, é o tipo de suspensão mais frequentemente utilizado nos automóveis devido a sua simplicidade e baixo custo. É constituído por um sistema mola-amortecedor e um triângulo inferior. O amortecedor utilizado é do tipo hidráulico telescópico. A parte superior do amortecedor é fixa directamente à carroçaria e a inferior é fixa directamente na manga do eixo. A maior desvantagem deste sistema é a necessidade de grande espaço vertical devido à altura dos sistemas mola-amortecedor (Freitas, 2006). A sua representação pode ser observada na Figura 1.

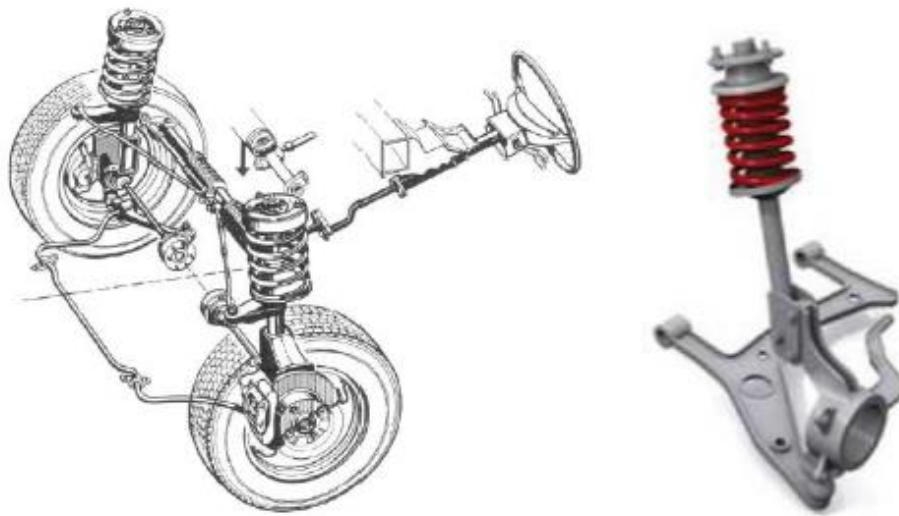


Figura 1 - Suspensão Mac Pherson (Freitas, 2006) (Sleiman, 2010)

- Braços articulados sobrepostos, é o tipo de suspensão mais utilizado em veículos desportivos e de alta gama. Este tipo de suspensão permite um melhor controlo das vibrações (define as alterações de posição das rodas, causadas pelas forças e momentos entre as rodas e a estrada, ou pelo movimento longitudinal da roda. Estas alterações devem-se à elasticidade dos componentes que constituem a suspensão), facilitando a configuração da suspensão (Lima, 2014). Este tipo de suspensão pode ser visto na Figura 2.



Figura 2 - Braços articulados sobrepostos (Sleiman, 2010).

- Multilink, é o tipo de suspensão mais recente e é incorporada sobretudo em carros de luxo, devido a sua complexidade e ao seu elevado custo. É composto por dois triângulos, contudo a parte superior é constituída por múltiplas partes articuladas que permitem o ajuste das características da suspensão. É de referir que neste tipo de suspensão, contrariamente aos anteriores, o amortecedor e a mola formam duas peças distintas. A sua representação pode ser observada na Figura 3 .

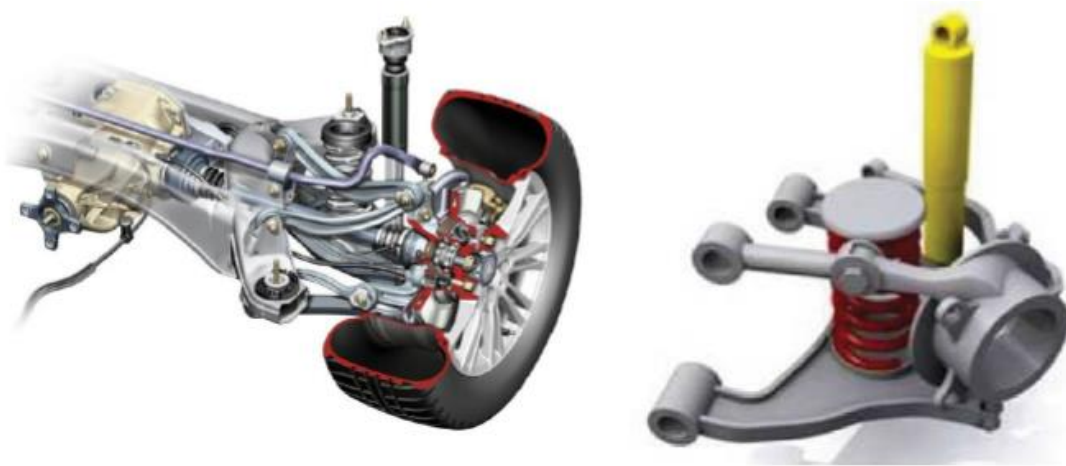


Figura 3 - Suspensão Multilink (Lima, 2010) (Sleiman, 2010).

Nos sistemas de eixo rígido são abordados dois tipos de suspensão: barras de ancoragem e eixo de Dion. O sistema de eixo rígido foi o primeiro a ser desenvolvido, começou por ser utilizado em carruagens e utilizado até aos dias de hoje em veículos comerciais. Possuem elevada simplicidade de construção, robustez e baixo custo de construção. Neste grupo é possível encontrar os seguintes tipos de suspensão:

- Barras de ancoragem, é um tipo de suspensão muito utilizado em veículos que possuem tracção a frente já que é uma solução simples, barata e robusta. Neste tipo, as rodas são unidas por uma barra que permite alguma flexibilidade. Uma barra rígida, chamada barra Panhard, faz a ligação entre uma extremidade do eixo e a carroçaria que serve para manter a carroçaria lateralmente por cima do eixo e limitar então os movimentos horizontais. Este tipo de suspensão pode ser visto na Figura 4.



Figura 4 - Barras de ancoragem (Sleiman, 2010).

- Eixo de Dion, a vantagem deste tipo de suspensão é que permite reduzir ao mínimo o peso das massas não suspensas, o que lhe confere a simplicidade de um eixo rígido. Um exemplo deste tipo de suspensão é a do eixo constituído por uma simples travessa de secção tubular ligada a carroçaria por pontes, para poder reagir às cargas longitudinais e por um sistema de hastes rígidas para as cargas transversais (Cerpa, 2000). A Figura 5 apresenta a configuração para este tipo de suspensão.

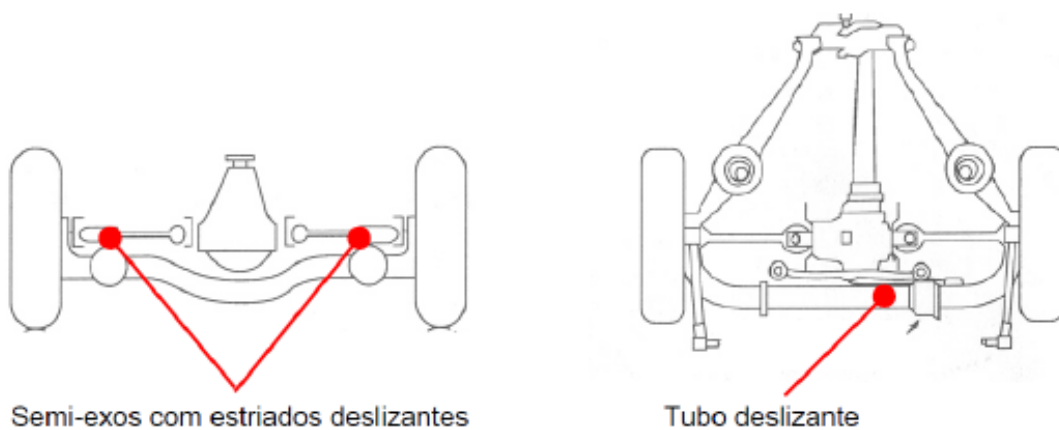


Figura 5 - Configuração da suspensão de Dion (Freitas, 2006).

2.3. Sistema de suspensão semi-activa

Desde o surgimento dos sistemas de suspensão semi-activa, no início dos anos 70, que o desenvolvimento e investigação sobre este tipo de sistemas têm aumentado.

Estes sistemas são em tudo iguais aos passivos, ou seja, apenas dissipam energia, produzindo no entanto uma força controlada em tempo real, que se opõe a velocidade entre a carroçaria e a roda, tal como os sistemas de controlo activo (Sleiman, 2010).

A suspensão semi-activa tem maior fiabilidade do que a activa uma vez que é um sistema mais robusto e mais simples (com menos componentes). Este sistema permite a adaptação do amortecimento ao longo do tempo para excitações que podem variar de forma rápida ou lenta. Estas mudanças de características ao longo do tempo são obtidas a partir de uma lei de controlo. A qual se baseia na modificação em tempo real das características dos dispositivos de dissipação de energia para a ocorrência de modificação de características (Picado, 1998). O amortecimento variável em suspensões semi-activas apresenta a vantagem de ter baixo tempo de reacção, na ordem das dezenas de milissegundos, requerendo um consumo de aproximadamente de 20 W de potência, facilmente suportado pela bateria do veículo e com pouco impacto no consumo de combustível (Crivellaro, 2008), (Sleiman, 2010).

Uma vez que estes actuadores apenas exercem forças dissipativas, estes apresentam descontinuidades no sinal de força no momento de gerarem esforços para reduzir a transmissão de vibração para a carroçaria e no momento de produzirem força activa (a favor do movimento) os actuadores permanecem inactivos de forma a não gerarem forças no sentido contrário ao movimento. Estas descontinuidades apresentam desconforto para os usuários dos veículos, uma vez que se manifestam como pequenos solavancos (Crivellaro, 2008).

Existem diversos tipos de suspensão semi-activa: a suspensão semi-activa hidropneumático em que o amortecedor clássico é substituído por uma esfera que contém óleo mineral e azoto que forma o elemento elástico e a suspensão com amortecedor hidráulico com orifício variável em que o controlo é efectuado através do alargamento ou estreitamento do diâmetro do orifício, de forma a controlar a passagem do óleo (Almeida, 2002), (Moura, 2003).

Em destaque encontram-se as suspensões semi-ativas à base de fluidos magneto-reológicos, em que o amortecedor clássico é substituído por um amortecedor que utiliza um fluido cujo comportamento reológico é variável em função de um campo-magnético (magneto-reológico).

2.4. Fluido Magneto-reológico

A descoberta de fluidos MR e ER ocorreu durante a década de 40 (Rabinow, 1948, Winslow 1949 apud Carlson; Catanzarite; Clair, 1996).

Na altura da descoberta dos fluidos MR não lhe foi dada grande importância, e só passado cerca de 40 anos, entre 1980 e 1990, é que estes fluidos começaram a ser alvo de uma elevada investigação, existindo um elevado número de trabalhos publicados nesses anos. Até então, as atenções eram sobretudo voltadas para os fluidos electro-reológicos (ER) devido a dificuldade de obter misturas homogêneas e com boa estabilidade para os fluidos MR (Tusset, 2008) (Moura, 2003).

Os fluidos MR são caracterizados por serem capazes de alterar as suas propriedades reológicas quando submetidos a um campo magnético, sendo que os fluidos ER são capazes de alterar essas mesmas propriedades quando submetidos a um campo eléctrico (Paschoal, 2011). Na figura 6 pode ser observado o comportamento de um fluido MR submetido a um campo magnético.

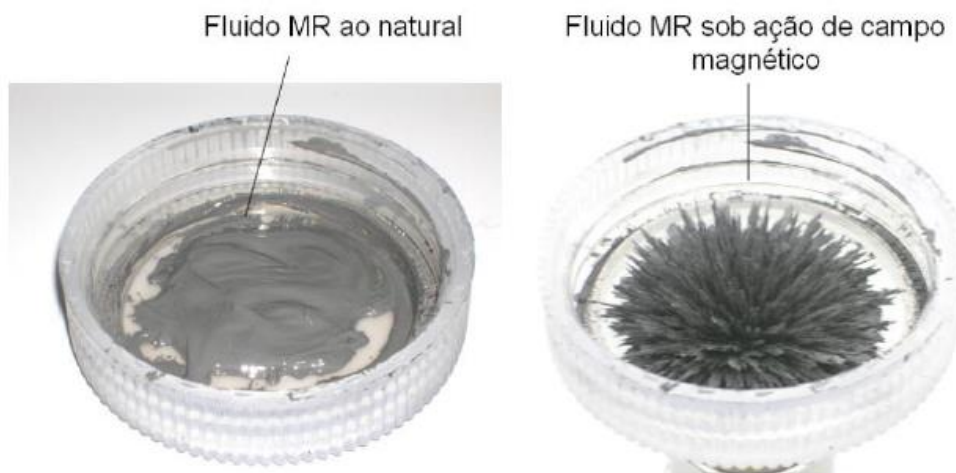


Figura 6 - Fluido no estado normal (esquerda) e submetido a um campo magnético (direita) (Crivallero, 2008).

As mudanças das propriedades nos fluidos MR são apresentadas sob a forma de resistência ao escoamento do fluido, de resposta rápida (5 milésimos de segundo), silenciosa e de variação directamente proporcional a intensidade do campo magnético aplicado (Bombard, 2005).

Estes fluidos apresentam elevada resistência, baixa viscosidade (sem variações significativas nas suas propriedades) e alargado intervalo de temperatura (entra -40°C e 150°C). Possuem um comportamento plástico similar ao fluido ER, mas ao contraio deste, o fluido MR possui uma tensão de escoamento muito superior. Devido a sua elevada resistência, podem ser utilizados em dispositivos mais compactos do que os que são usados os fluidos ER, embora apresentado com um desempenho similar. Outra vantagem em relação aos fluidos ER é que os fluidos MR não são afectados pela presença de impurezas químicas (Carneiro,2009) (Lima,2011).

A tabela 1 apresenta de forma resumida as características dos fluidos MR e ER.

Tabela 1 - Características dos fluidos MR e ER (Kotinda & Júnior, 2003).

Propriedade	MR	ER
Tensão máx. de corte	50 - 100 [Kpa]	2 - 5 [Kpa]
Campo máximo	~250 [KA/m] (limitado pela saturação)	~4 [KA/m] (limitado pela falha do dispositivo)
Viscosidade	0.1 - 10 [Pa.s]	0.1 - 10 [Pa.s]
Faixa de temperatura de operação	(-40 a 150) [°C] (limitado pelo fluido base)	10 a 90 [°C] (Iónico, DC) -25 a 125 [°C] (não iónico, Ac)
Estabilidade	Inalterado pela maioria de impurezas	Não tolera
Tempo de resposta	<milissegundos	<milissegundos
Densidade	3-4 [g/cm ³]	1 - 2 [g/cm ³]
Densidade máx. de energia	0.1 [J/cm ³]	0.001 [J/cm ³]
Fonte de potência	2 - 25 [V] @ 1 - 2 [A] 2 - 50 [W]	2 - 25 [V] @ 1 - 10 [A] 2 - 50 [W]

2.4.1. Princípio de funcionamento

Quando um fluido electromagnético é submetido a um campo magnético, as partículas que se encontram inicialmente dispersas e em total desordem começam a alinhar-se

paralelamente ao fluxo magnético. A formação destas colunas vai alterar-se, reversivelmente, as propriedades do fluido, e fazer variar a sua viscosidade. O fluido passa do estado líquido para um estado semi-sólido (Santos, 2011) (Sleiman, 2010).

A formação destas colunas é apresentada na figura 7, na qual estão indicadas as diversas etapas associadas ao processo de magnetização do fluido (Sleiman, 2010).

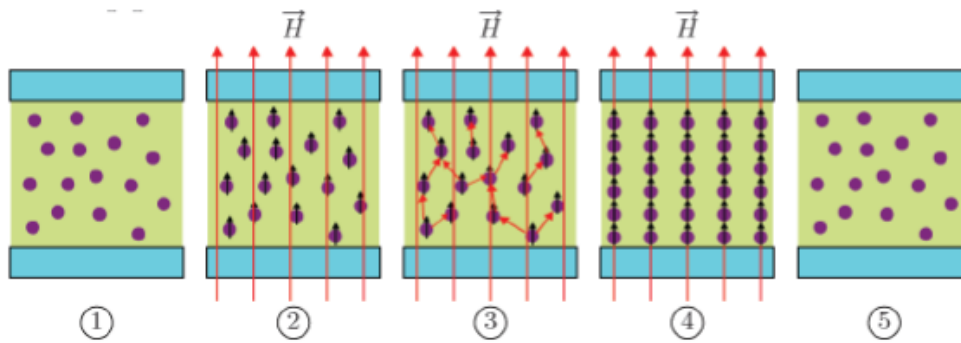


Figura 7 - Etapas de funcionamento do fluido MR (Sleiman, 2010).

Inicialmente (1), na ausência de um campo magnético, as partículas encontram-se todas dispersas e em desordem. De seguida, é aplicado um campo magnético (2) que provoca a magnetização das partículas que se dispõem paralelamente às linhas do campo magnético e com a mesma direcção. As partículas que já se encontram magnetizadas (3) comportam-se como dipolos magnéticos, submetidos a forças de interacção magnética. Formam-se colunas (4) alinhadas com as linhas do campo magnético. Quando é retirado o campo magnético (5) as partículas retornam ao estado inicial.

Dependendo da intensidade do campo magnético e das tensões de corte, os fluidos MR podem apresentar diferentes comportamentos (elástico e visco-plástico) (Costa, 2008). Quando os fluidos não são submetidos a campos magnéticos, apresentam um comportamento Newtoniano (tensão de corte é proporcional ao produto entre a viscosidade e a deformação). Ao submeter o fluido a um campo magnético este altera o seu comportamento, sendo que, a tensão de corte é proporcional ao produto da viscosidade e da razão de deformação mais a tensão de escoamento, o que pode ser representado pelo modelo de Bingham (Neto, 2008).

Os modelos Newtoniano e Bingham podem ser representados pelas seguintes equações:

Modelo Newtoniano:

$$\tau = \nu \dot{\gamma} \quad (1)$$

Modelo Bingham:

$$\tau = \tau_y(H) + \nu \dot{\gamma} \quad (2)$$

onde,

H - força do campo magnético

τ - tensão de corte

ν - viscosidade

$\dot{\gamma}$ - razão de deformação

τ_y - tensão de escoamento

Na Figura 8 apresenta tensão de escoamento dos fluidos MR em função de campo magnético (Neto, 2008).

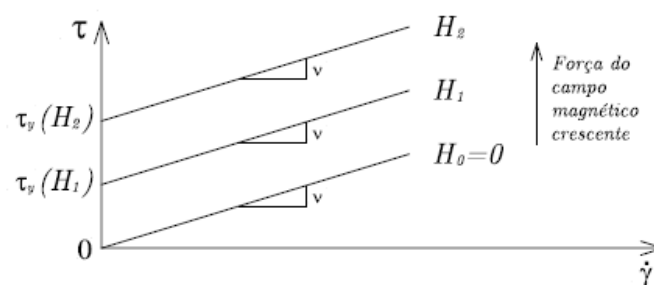


Figura 8 - Tensão de corte VS razão de deformação para fluidos MR com diferentes campos magnéticos (Neto, 2008).

Como é possível observar na Figura 8, quanto maior for o campo magnético, maior é o limite da tensão.

2.4.2. Composição

Apesar da composição dos fluidos magneto-reológicos ser muito variável, de modo geral, são constituídos por (Crivellaro, 2008) (Bombard, 2005):

- Partículas magnéticas ou pó magnético (geralmente ferro magnético). Em geral, o tamanho das partículas do pó encontra-se entre 1 e 8 μm . Existem também partículas entre 20 e 50 μm , contudo, a sedimentação destas é muito rápida.
- Líquido não volátil e quimicamente compatível com partículas magnéticas, geralmente óleos com viscosidade inferior a 200 MPa à temperatura de 20°C.
- Aditivo estabilizante de forma a evitar agregações das partículas;
- Aditivo tixotrópico que retarda a sedimentação do pó magnético. Pode ser sílica pirogênica hidrófila ou hidrofóbica, poli-vinil-pirrolidona, argilas modificadas, etc.

2.4.3. Modos de funcionamento

A utilização de fluidos MR para a construção de dispositivos semi-ativos baseia-se no princípio de funcionamento. Existem três modos de funcionamento do fluido magnético reológicos.

- Modo válvula

Este é o modo mais comum de funcionamento do fluido MR. O fluido MR é confinado entre duas placas magnéticas fixas paralelamente que funcionam como válvulas. O fluido entre elas sofre uma diferença de pressão para fluir entre as placas e, quando submetido a um campo magnético, as correntes formam uma barreira ao fluxo do fluido. O módulo válvula é geralmente aplicado em embraiagens, amortecedores e travões. É também aplicado em suspensões nos veículos automóveis (Costa, 2008) (Lima, 2011). Na figura 9, está representado o funcionamento modulo válvula e na Figura 10 é apresentado um dispositivo de amortecimento (amortecedor) construído com base neste modo.

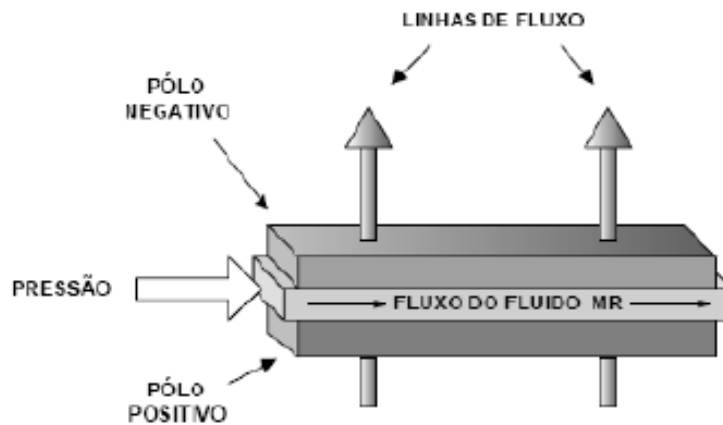


Figura 9 - Modo válvula (Lima, 2011).

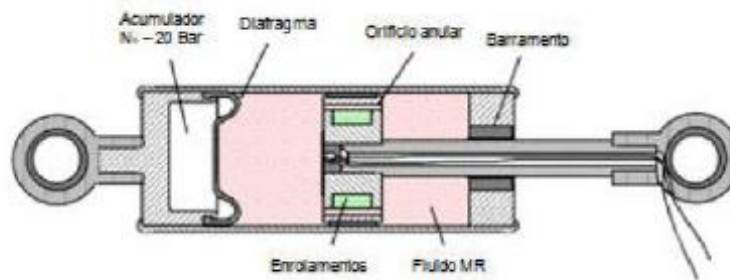


Figura 10 - Amortecedor construído em modo válvula (Costa, 2008).

- Modo de corte ou directo

Tal como no modo de válvula o fluido encontra-se entre duas placas posicionadas paralelamente. Contudo, neste modo, uma das placas é deslocada em relação a outra (mantêm-se paralelas e à mesma distancia) criando uma tensão de corte entre as placas e o fluido. O modo de corte é geralmente usado em amortecedores MR projectados para desenvolver força máxima de 200 KN. Na Figura 11, é possível observar o principio de funcionamento do modo de corte e na Figura 12 apresenta-se um dispositivo amortecedor baseado no modo de corte.

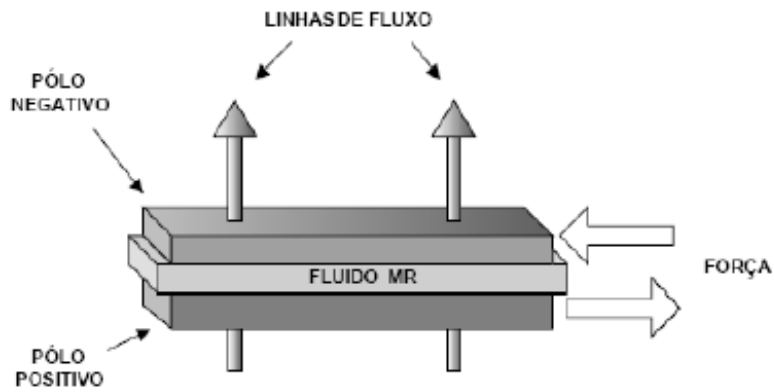


Figura 11 - Modo de corte ou directo (Lima, 2011).

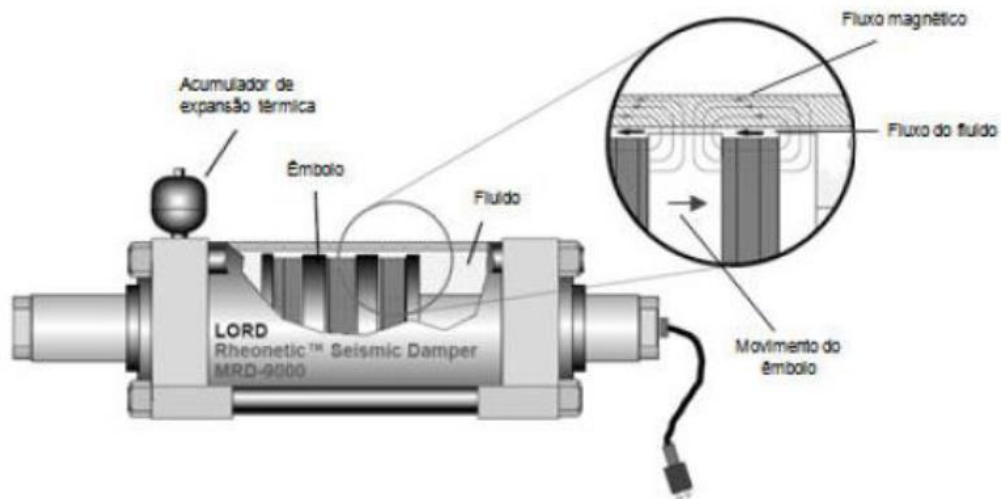


Figura 12 - Amortecedor construído em modo corte (Costa, 2008).

- Modo esmagamento ou aperto

Neste modo o fluido MR encontra-se entre duas placas que são responsáveis pela compressão de uma fina camada do fluido MR. Quando exposto a um campo magnético, as partículas do fluido vão formar uma estrutura de corrente paralela às linhas do campo magnético. Com o aumento da intensidade do campo magnético, a resistência ao desvio da estrutura formada também aumenta, aumentando a resistência ao movimento das placas. O modo de esmagamento é geralmente utilizado em aplicações industriais para controlo de vibrações de pequena intensidade. Na Figura 13,

é possível observar a forma de funcionamento do modo esmagamento ou aperto e na Figura 14, é apresentado um amortecedor construído com base no aperto.

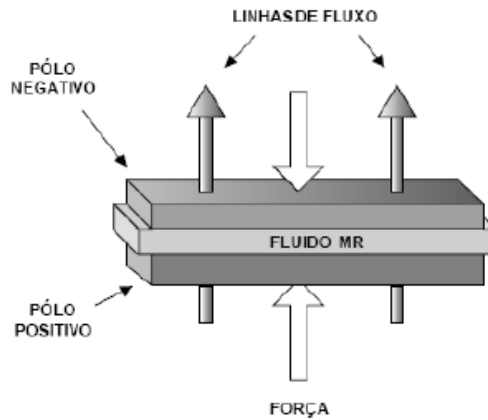


Figura 13 - Modo de esmagamento ou aperto (Lima, 2011).

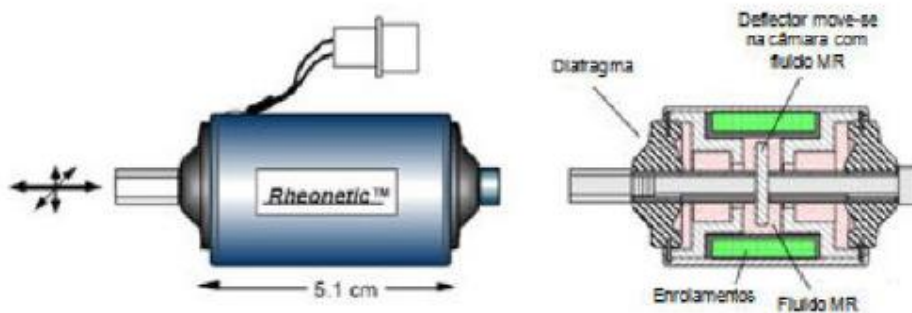


Figura 14 - Dispositivo construído com o modo esmagamento (Costa, 2008).

2.5. Amortecedores Magnéto-Reológicos

2.5.1. Funcionamento

O fluido magneto-reológico é sobretudo usado em amortecedores devido à sua capacidade de alterar, de forma reversível, a sua viscosidade.

Os amortecedores MR são semelhantes aos amortecedores tradicionais, com a diferença de possuírem uma bobina, introduzida no pistão, no qual vai gerar campo magnético. Devido ao movimento do pistão, o fluido MR flui, de uma câmara para outra, através de

uma válvula. O aparecimento de um campo magnético, perpendicular à válvula de amortecedor, cria uma região de ativação fazendo com que as partículas fiquem alinhadas ao longo do fluxo do campo magnético. O alinhamento das partículas cria uma resistência à passagem do fluido que aumenta com o aumento da intensidade do campo magnético, o que se traduz pela força do amortecedor (Lima, 2011) (Sleiman, 2010). Na figura 15 pode-se observar um amortecedor MR.

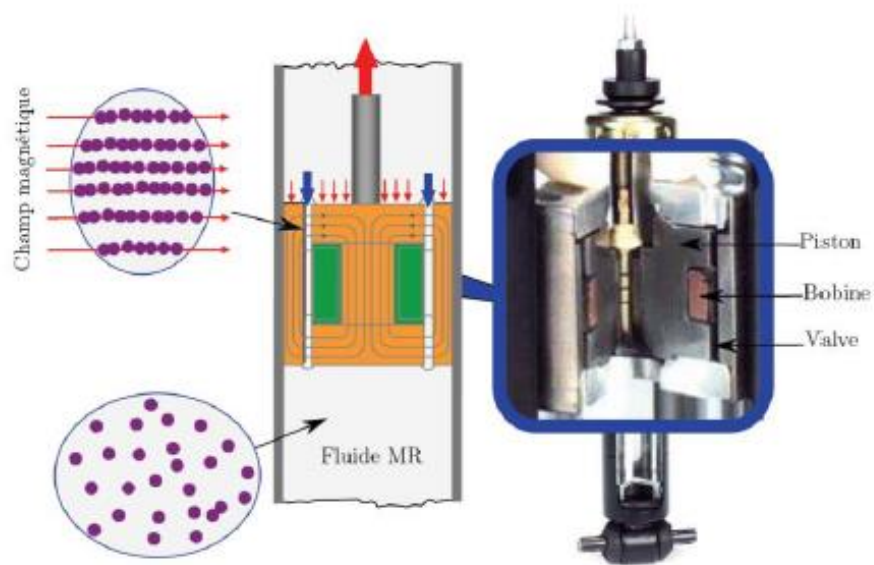


Figura 15 - Vista em corte e representação do princípio de funcionamento de um amortecedor MR (modo válvula) (Sleiman, 2010).

Apesar da força dos amortecedores MR ser gerada de forma passiva e apenas serem capazes de dissipar a energia do sistema, a intensidade da força pode ser controlada em tempo real. Isso acontece quando se submete o fluido MR a um campo magnético controlado (Lima, 2011).

2.5.2. Construção de amortecedores MR

É relativamente fácil de fazer um fluido MR que satisfaça razoavelmente as necessidades básicas da maioria dos amortecedores MR. Entretanto, para se obter amortecedores MR altamente eficientes, deve-se ter em atenção algumas das suas características (Bombard, 2005) (Genç, 2002) :

- viscosidade;
- tensão de escoamento;
- estabilidade e durabilidade.

As duas primeiras características estão directamente ligadas ao desempenho do amortecedor MR (Carlson, 2001). Quanto mais altas as tensões de escoamento sob o campo magnético e mais baixos os coeficientes de viscosidade o fluido apresentar, melhor será o seu desempenho.

As duas últimas características estão ligadas à manutenção do desempenho de um amortecedor com o passar do tempo e com o seu uso. A estabilidade do fluido MR garante que o amortecedor fique sem utilização por longos períodos (ou que tenha pouco uso) mantendo o seu desempenho inalterado, ou capaz de recuperar as suas características rapidamente. A durabilidade do fluido MR está relacionada com a energia circular que o fluido consegue suportar ao longo da sua vida útil, sem perder o seu desempenho. Esta energia vem das forças de corte que agem sobre as partículas do fluido que, com o tempo, vão-se deformando e quebrando-se provocando o espessamento do fluido.

2.5.3. Geometria

Existem três tipos de geometria para a construção de amortecedores magnéto-reológicos. O primeiro e mais utilizado é o amortecedor MR do tipo monotubo. É constituído apenas por um tubo que contém o fluido, um pistão e a respectiva haste e ainda um dispositivo de acumulação. O dispositivo de acumulação é um reservatório que contém um gás, habitualmente o azoto, sob pressão de, aproximadamente 20 bar e possui uma membrana que o mantém fechado e que serve de barreira entre o fluido MR e o gás comprimido. O acumulador permite a adaptação às mudanças de volume devido ao movimento da haste do pistão e superar os fenómenos de cavitação durante o funcionamento a altas velocidades, uma vez que, ao contrário do gás, o fluido MR não é compressível. Esta geometria está representada na figura 16.

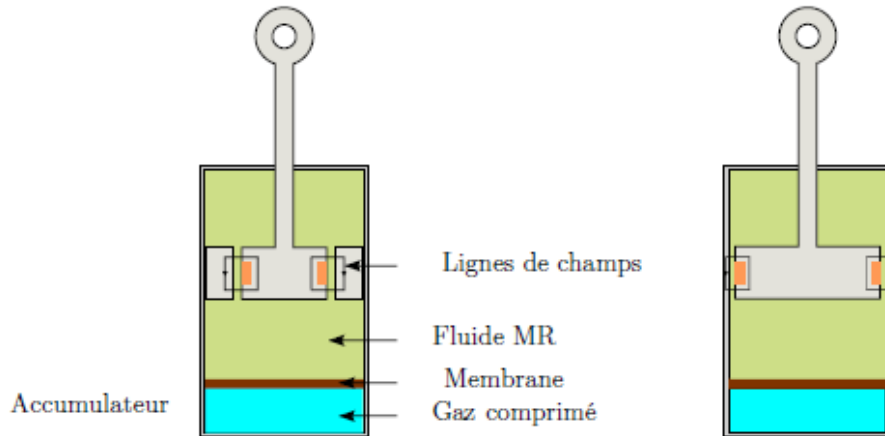


Figura 16 - Geometria monotubo com funcionamento válvula (esquerda) e modo corte (direita) (Sleiman, 2010).

O segundo tipo de geometria é o amortecedor de tubo duplo. Este amortecedor é constituído por dois tubos coaxiais, sendo que a zona limitada pelo tubo interior e pelo tubo exterior define o reservatório exterior. Os dois reservatórios são separados por uma válvula. Assim que o amortecedor funciona em compressão, o fluido MR passa do reservatório interior para o exterior e vice-versa. Esta geometria pode ser vista na figura 17.

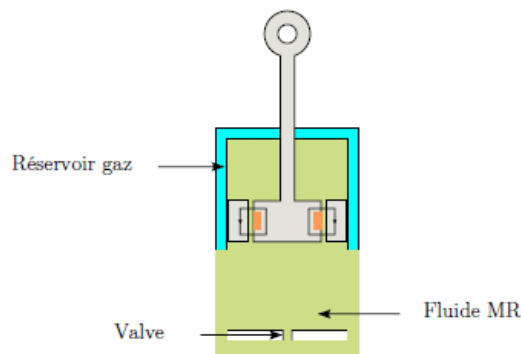


Figura 17 - Amortecedor MR de tubo duplo (Sleiman, 2010).

O terceiro é um amortecedor haste dupla. Com este tipo de geometria já não existe o problema da variação de volume na câmara interior no momento em que a haste se move, uma vez que o volume ocupado pela entrada da primeira haste é compensado pela saída da segunda haste. Portanto não existe a necessidade de nenhum dispositivo de compensação de volume. Esta geometria é apresentada na figura 18.

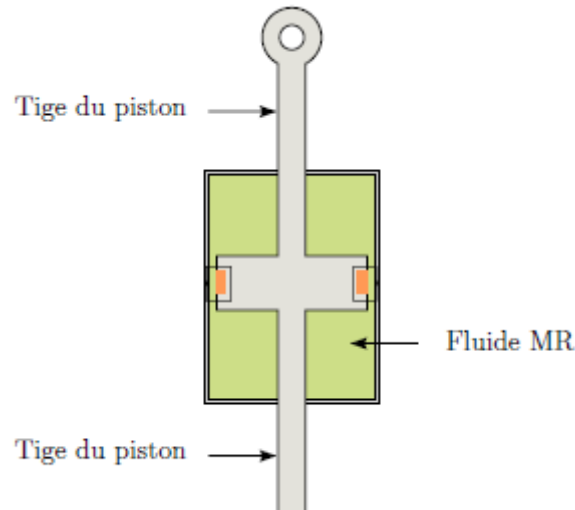


Figura 18 - Amortecedor MR de haste dupla (modo corte) (Sleiman, 2010).

2.5.4 Aplicações

Devido ao funcionamento altamente fiável, à sua capacidade de adaptação e baixo custo de implementação e funcionamento, as aplicações para amortecedores MR são das mais diversas.

Estes amortecedores estão disponíveis comercialmente e são utilizados em diversas áreas, incluindo aplicações em engenharia mecânica, civil, indústria automóvel, medica entre outros (Carneiro, 2009).

No sector da industria automóvel, existem suspensões semi-activas com amortecedores MR, utilizadas em assentos para veículos pesados e agrícolas.

Por exemplo o amortecedor modelo RD-1005-3 é um amortecedor utilizado no sistema de suspensão de assentos chamado *Motion Master semi-active dampyng system*, representado na figura 19. O amortecedor possui uma força de amortecimento de 1500 N para velocidades superiores a 200mm/s e para uma corrente de 1 A. Quando a corrente é retirada o amortecedor apresenta uma força de amortecimento inferior a 700 N para a mesma velocidade (Sleiman, 2010).

O sistema de controlo do amortecedor é composto por um controlador com sonda integrada, por um interruptor e por um microprocessador. Quando o veiculo circula na estrada com poucas irregularidades, o amortecedor funciona em modo passivo, não

sendo accionado o campo magnético. No momento em que o veículo se encontra numa estrada que tenha irregularidades significativas (pré-definidas), o algoritmo detecta a posição relativa do assento e da sua mudança ao longo do tempo e produz um comando com corrente apropriada de forma a estabilizar o assento.

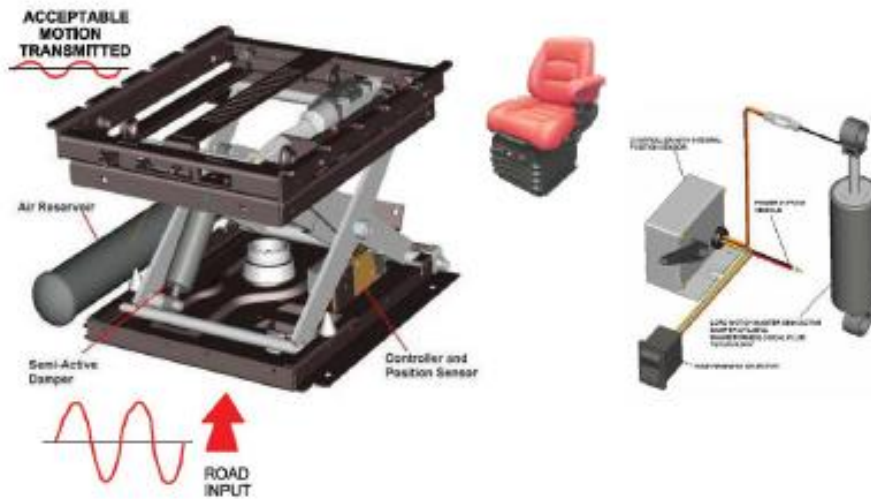


Figura 19 - Esquema de instalação de um amortecedor MR num assento de veículos pesados (Sleiman, 2010).

Ainda no sector automóvel, os amortecedores MR são usados nos sistemas de suspensão automóvel. Estes sistemas adaptam-se ao estilo de condução e ao estado da estrada, aumentando o amortecimento para manter o movimento do corpo reduzido para preservar o conforto quando o estado da estrada é degradado (Louam, 2013). Este comportamento é semelhante ao da suspensão activa (Figura 20).



Figura 20 - Suspensão convencional (esquerda) vs suspensão activa (direita) (Bombard, 2005).

Na área da engenharia civil, há já alguns anos que se estuda a utilização de amortecedores MR na construção de edifícios e pontes para atenuação de vibrações provocadas por sismos e pela acção do vento. Neste contexto, a Engenharia mecânica tem sido a área que mais beneficiou com a tecnologia MR (Sleiman, 2010).

Na Figura 21 é possível observar um esquema de edifício em que são colocados actuadores MR em cada andar, de forma a gerar forças com uma intensidade de até 200 KN entre as lajes dos andares adjacentes, de forma a minimizar vibrações geradas por sismos (Crivellaro, 2008) (Louam, 2013).

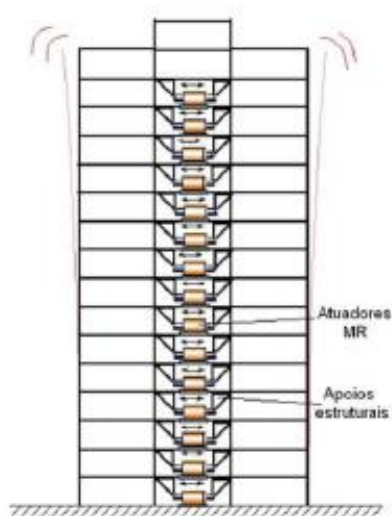


Figura 21 - Esquema de um edifício com actuadores MR (Crivellaro, 2008).

Outro exemplo de aplicação de amortecedores MR em estruturas de engenharia civil está apresentado na Figura 22. A ponte atirantada, com um comprimento total de 800m, construída sobre o lago Dongting na província de Hunan, China. A abertura da ponte ocorreu no final de 2000. Desde então a ponte apresentava graves problemas de vibração nos cabos devido a acção de ventos de baixa velocidade e chuvas moderadas, o que poderia ter originado situações de risco elevado de colapso dos cabos. De forma a minimizar o efeito das vibrações foi adoptado um sistema de atenuação de vibrações com actuadores MR (Bombard, 2005) (Crivellaro, 2008).



Figura 22 - Ponte atirantada sobre o lago Dongting e pormenor de um actuador colocado nos tirantes (Crivellaro, 2008).

Os actuadores MR tem sido muito utilizados nas áreas da medicina e da fisioterapia, tanto na construção de próteses inteligentes como na construção de aparelhos para reabilitação/actividade física.

A construção de próteses de pernas, com um amortecedor MR ao nível da articulação do joelho permite ao utilizador uma melhor estabilidade e equilíbrio. Devido a rapidez do tempo de resposta dos fluidos MR, o utilizador pode movimentar-se com um tempo de reacção semelhante ao tempo de reacção neuronal humano (Sleiman, 2010).

As Figuras 23 e 24 apresentam exemplos de próteses semi-activas MR (Crivellaro, 2008).



Figura 23 - Próteses semi-activas MR (Crivellaro, 2008).

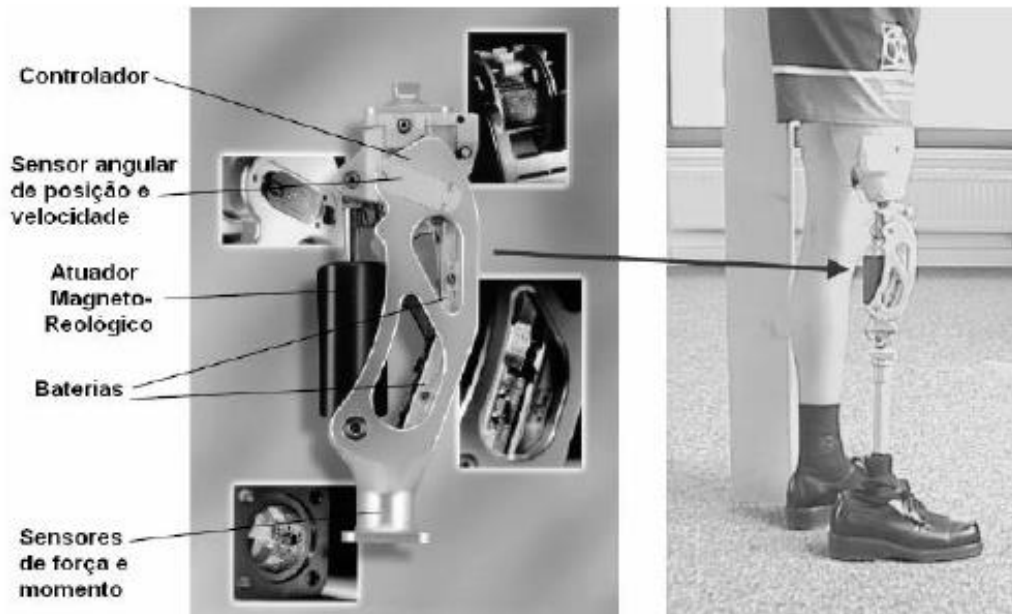


Figura 24 - Prótese de perna mecânica Magnetix de MOTHEC baseados em actuadores MR (Crivellaro, 2008).

Outro exemplo de utilização de amortecedores MR é em máquinas de lavar roupa, nesta aplicação os amortecedores MR actuam apenas numa faixa de frequência de rotação, especificamente quando o tambor de lavagem acelera para alcançar a velocidade de rotação no modo de centrifugação, ou quando desacelera ao terminar esta operação. A Figura 25 apresenta a utilização de amortecedores MR numa máquina de lavar roupa (Crivellaro, 2008).

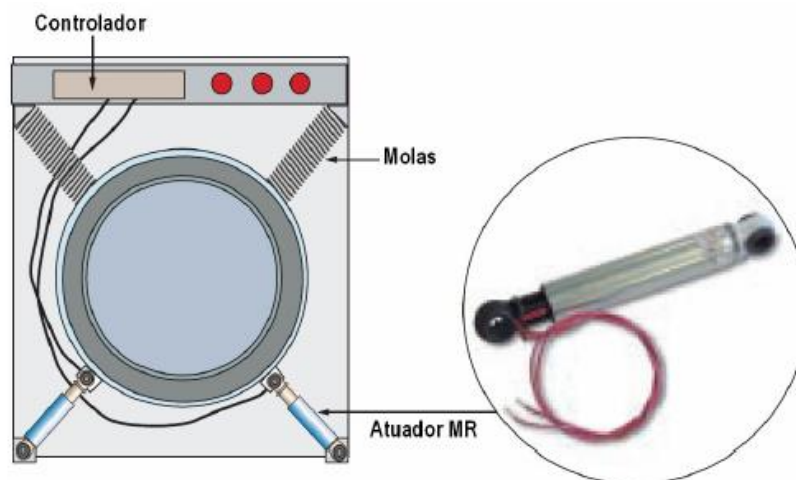


Figura 25 - Exemplo de uso de amortecedores MR em máquinas de lavar (Crivellaro, 2008).

3. Elaboração do Protótipo

Neste capítulo vão ser abordadas as construções efectuadas para a elaboração de um protótipo, para tal foi necessário fazer umas adaptações para poder implementar o amortecedor MR na bicicleta, essas adaptações foram feitas tanto a nível mecânico como a nível eléctrico. O amortecedor MR utilizado é um amortecedor MR modelo RD-1005-3, como se pode ver na Figura 26.

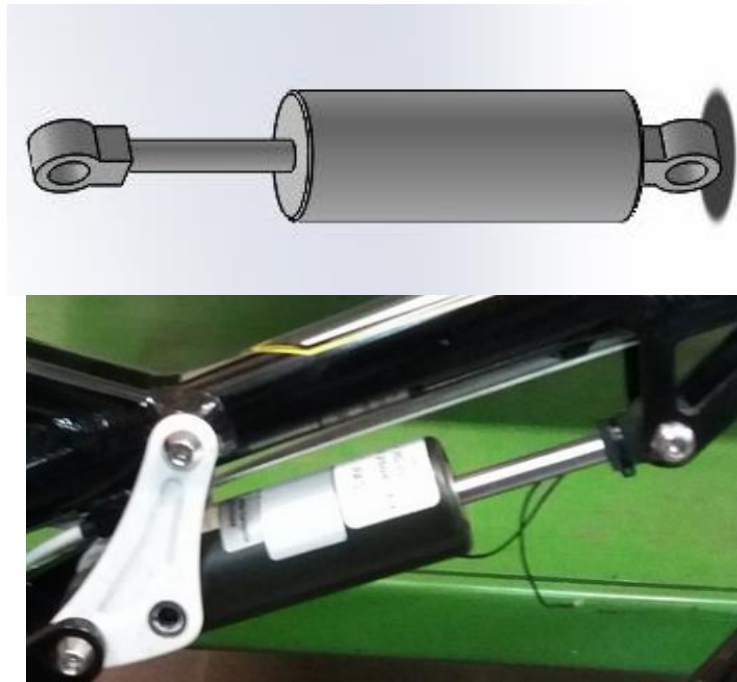


Figura 26 - Amortecedor MR modelo RD-1005-3.

A bicicleta utilizada é uma bicicleta BTT com suspensão integral (dianteira e traseira), como se pode ver na Figura 27.



Figura 27 - Bicicleta com suspensão integral.

3.1. Parte Mecânica

Para a obtenção de dados experimentais foi necessário a elaboração de um protótipo, para tal foi necessário fazer algumas adaptações, ou seja, foi necessário a construção de vários elementos para poder implementar a suspensão MR na bicicleta, tais como: batente superior e inferior, casquilhos, veios e anilha.

Estes elementos podem ser vistos nas Figuras 28, 29, 30 e 31 respectivamente e foram desenhados através do software SolidWorks, os seus respectivos desenhos definição encontram-se no Anexo 1.

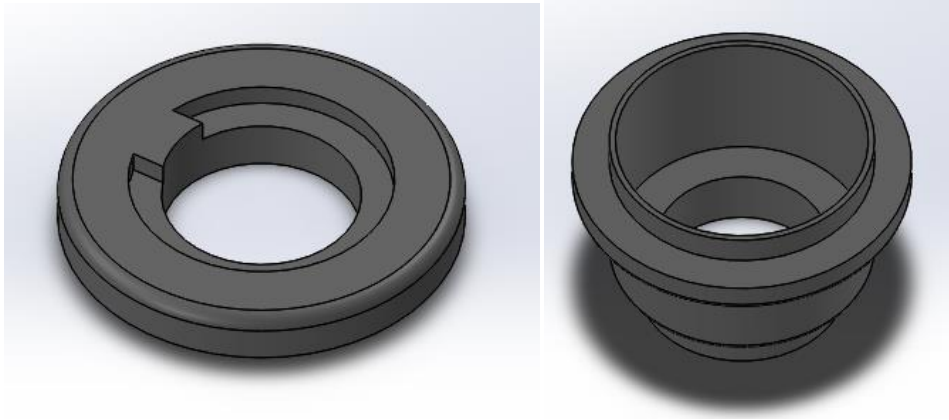


Figura 28 - Batente superior (esquerda) e batente inferior (direita).

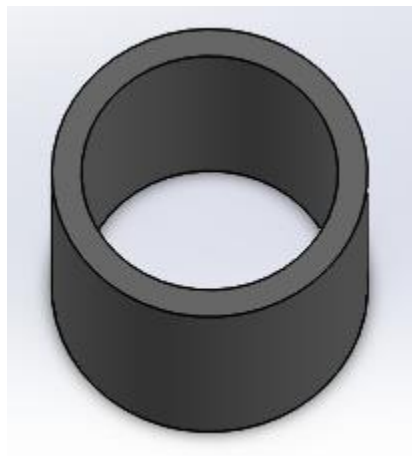


Figura 29 - Casquilho.

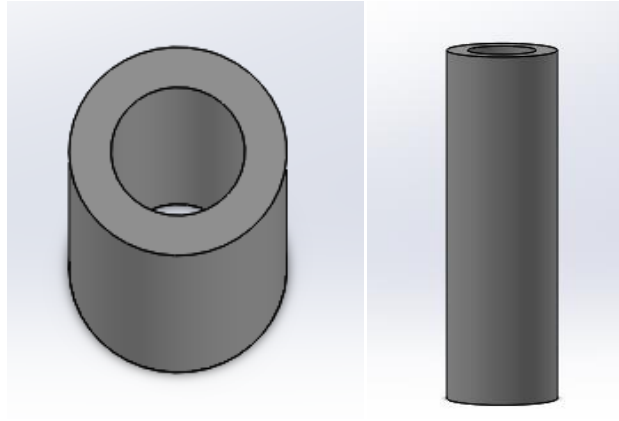


Figura 30 - Veio dianteiro (esquerda) e veio traseiro (direita).

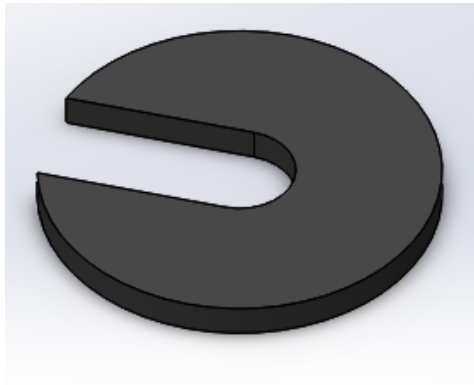


Figura 31 - Anilha.

A mola utilizada para a elaboração do protótipo foi reaproveitada de um amortecedor de um motociclo. Foi necessário calcular a constante da mola, realizado através de um teste efectuado numa prensa hidráulica, obtendo-se um valor de 15 N, como se pode observar na figura 32.

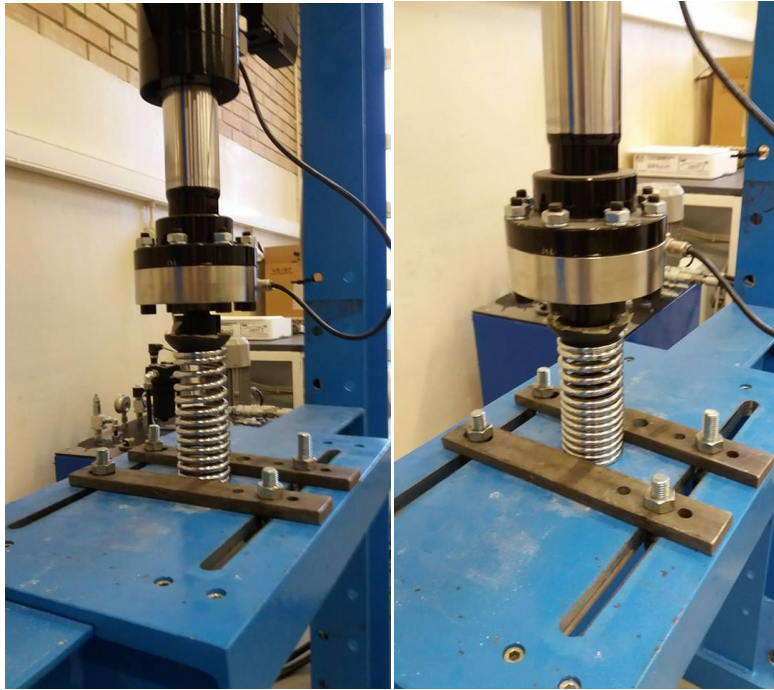


Figura 32 - Teste na prensa hidráulica.

Após a medição da constante da mola e todas as adaptações e construções dos elementos estarem desenhados podemos passar para a montagem final como se pode verificar na figura 33. Na Figura 34, apresentam-se as dimensões do protótipo.



Figura 33 - Montagem final.

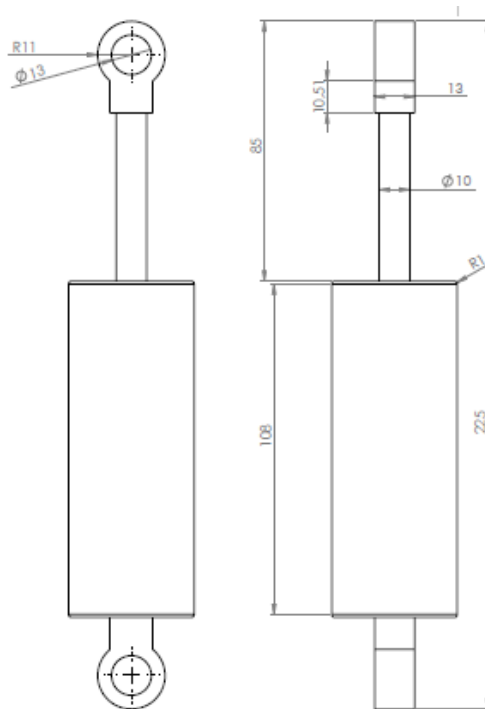


Figura 34 - Dimensões do protótipo.

Por fim, depois da montagem feita passamos para a aplicação do amortecedor MR na bicicleta, como se pode observar através da figura 35.



Figura 35 - Aplicação do amortecedor MR.

3.2. Parte Electrónica

O sistema de aquisição de dados utiliza um *Arduino MEGA2560* (Figura 36) que é responsável pela aquisição de dados, tratamento e envio de dados experimentais para um computador portátil através de *USB* (Pascoal, 2016).



Figura 36 - Arduino Mega2560.

Além de todo o processamento de dados, tem também como função o controlo da rigidez do amortecedor enviando um sinal *PWM*(Modulação por largura de pulso) para o controlador que trata a informação e actua, enviando uma tensão em corrente continua para assim criar um campo magnético que irá actuar sobre o fluido electromagnético.

Os sensores usados, para a aquisição de dados, isto é, por transformar os valores físicos em sinais eléctricos, são entre eles:

- 3 Acelerómetros *adx1335*;
- 2 Semicondutor sensível a temperatura *NTC*;
- Sensor de Corrente *ACS714*;
- Sensor de efeito hall *US1881*;
- 8 Imanes;
- Botão *ON/OFF*;
- Ferrite;
- Cabos de sinal.

Os acelerómetros são responsáveis por medir as flutuações ou vibrações nos diferentes tipos de piso, numa escala que varia entre 0g a 3g. Estes acelerómetros foram colocados

no assento, no manípulo e no quadro da bicicleta. Este tipo de acelerómetro pode ser visto na Figura 37.



Figura 37 - Acelerómetro adxl335.

Os sensores de temperatura medem a temperatura do amortecedor e do ambiente e estes sensores foram implementados no interior do amortecedor, este sensor pode-se ver na Figura 38.

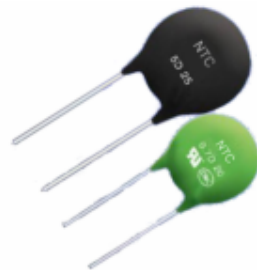


Figura 38 - Sensor de temperatura NTC.

O sensor de corrente ACS714 está ligado em série com o amortecedor e mede a corrente por ele consumida, este sensor está colocado no quadro da bicicleta e pode-se ver na Figura 39.



Figura 39 - Sensor ACS714.

O sensor US1881 é um sensor de efeito de *hall* que tem como função medir velocidades. Isto é sempre que um dos 8 ímãs (colocados nos aros da roda) passa por ele manda um impulso para o *Arduíno*. Este tipo de sensor pode-se ver na Figura 40.



Figura 40 - Sensor US1881.

O botão *ON/OFF* serve para dar início à leitura dos dados e encontra-se implementado no manípulo da bicicleta, como se pode ver na Figura 41.



Figura 41 - Botão On/Off.

Todos estes sensores estão ligados ao *Arduíno* (Figura 42) com cabos de sinal, com malha, de forma a diminuir eventuais interferências.

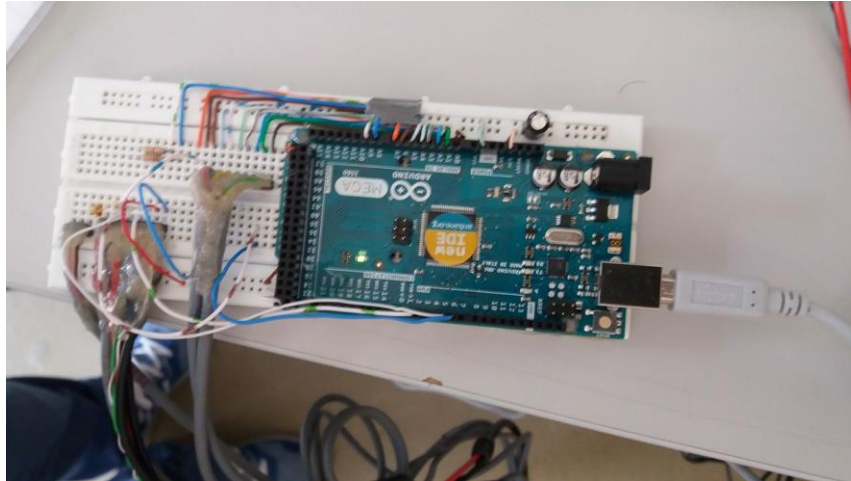


Figura 42 - Sensores ligados ao Arduino MEGA2560.

Na Figura 43, pode-se ver a bicicleta BTT toda instrumentada com os sensores referidos anteriormente.



Figura 43 - Bicicleta instrumentada.

4. Dados experimentais

Após construído e implementada a suspensão MR na bicicleta podemos prosseguir para a obtenção dos dados experimentais, onde vamos obter as vibrações no manípulo, nos pedais e no assento. Para tal foi necessário fazer várias simulações com diferentes valores de corrente: 0A, 0.1A, 0.2A, 0.3A, 0.4A e 0.5A.

Estes dados foram retirados na escola superior de tecnologia e gestão de Bragança (Estig) com a utilização de um PC portátil e através de um sistema de aquisição de dados, como se pode ver na Figura 44.

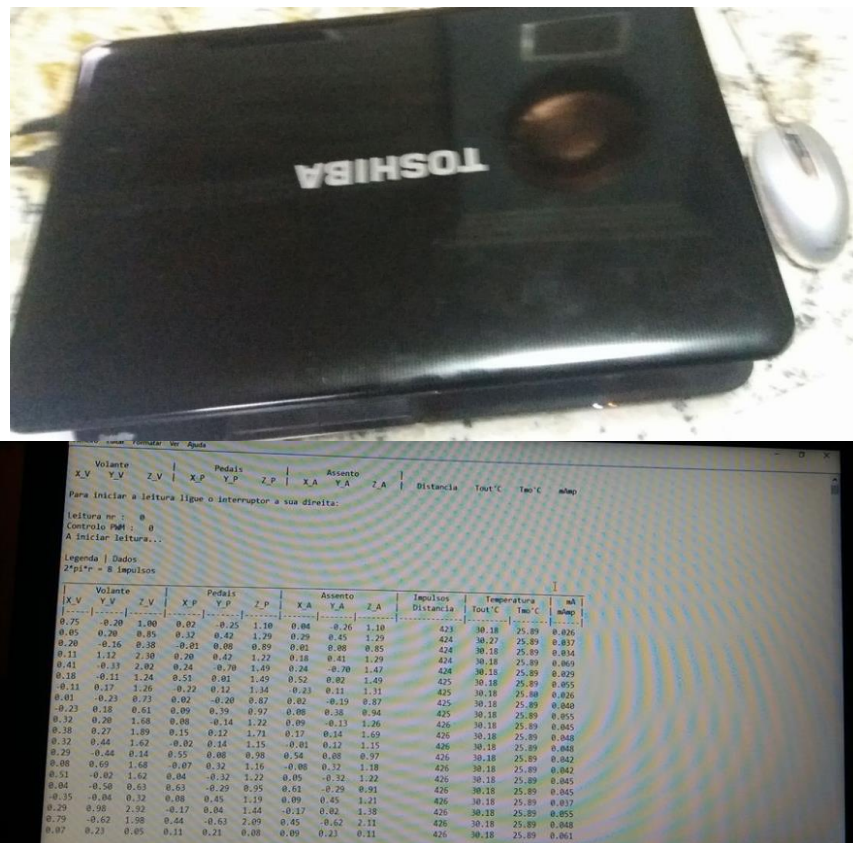


Figura 44 - Computador portátil e sistema de aquisição de dados.

Os ensaios experimentais também foram feitos em dois pisos diferentes, um piso liso e um piso mais irregular (paralelos) e com uma distância de 25m. A realização destas simulações pode ser observada na Figura 45.

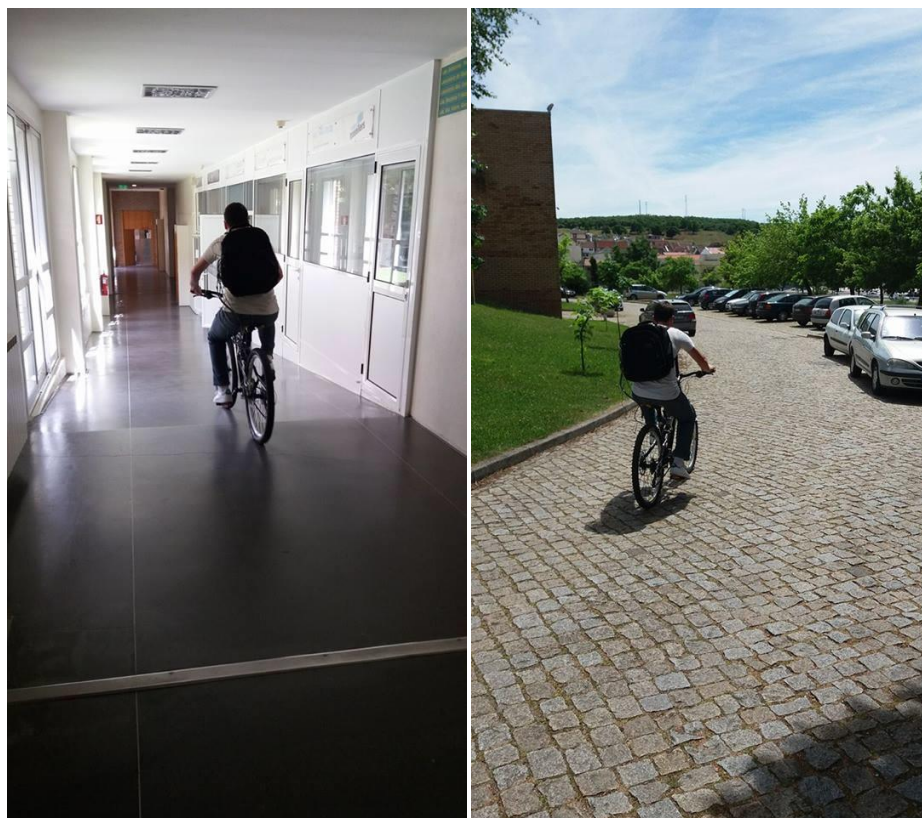


Figura 45 - Ensaio experimentais.

4.1. Resultados obtidos

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para os diferentes pisos (piso irregular e piso liso). Também são apresentadas as acelerações máximas e mínimas para cada simulação.

4.1.1. Piso irregular (Paralelo)

Nesta secção podemos observar os resultados obtidos nos vários ensaios efectuadas, ou seja, podemos observar as vibrações que a bicicleta sofre no manípulo, nos pedais e no assento. Os resultados são apresentados nas Figuras 46, 47 e 48.

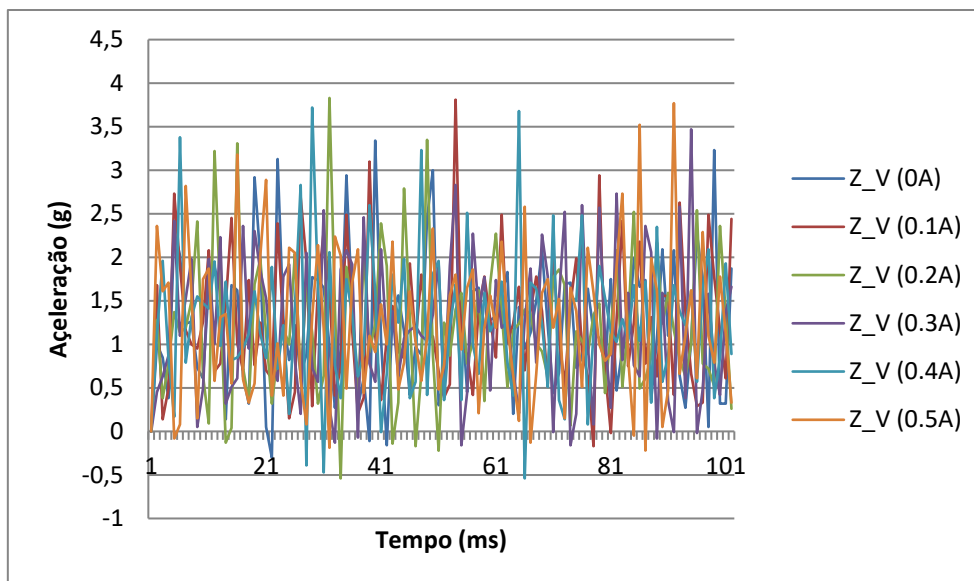


Figura 46 - Vibrações no manípulo da bicicleta.

Através da figura 46 é possível verificar que a influência da corrente aplicada no amortecedor é notória, pois os resultados diferem nas seis simulações efectuadas.

Também podemos observar que onde as vibrações no manípulo são máximas é na terceiro ensaio, quando aplicada uma corrente de 0.2A e atinge um valor máximo de 3.83 g e onde o manípulo sofre menor vibração é quando não se aplica corrente, atingindo uma aceleração de 3.34g. Na seguinte tabela pode-se ver as acelerações máximas e mínimas que a bicicleta sofre no manípulo.

Tabela 2 - Acelerações máximas e mínimas.

Vibrações no Manípulo		
Ensaio	Máximos (g)	Mínimos (g)
Z_V (0A)	3.34	-0.3
Z_V (0.1A)	3.81	-0.17
Z_V (0.2A)	3.83	-0.54
Z_V (0.3A)	3.47	-0.16
Z_V (0.4A)	3.72	-0.22
Z_V (0.5A)	3.77	-0.22

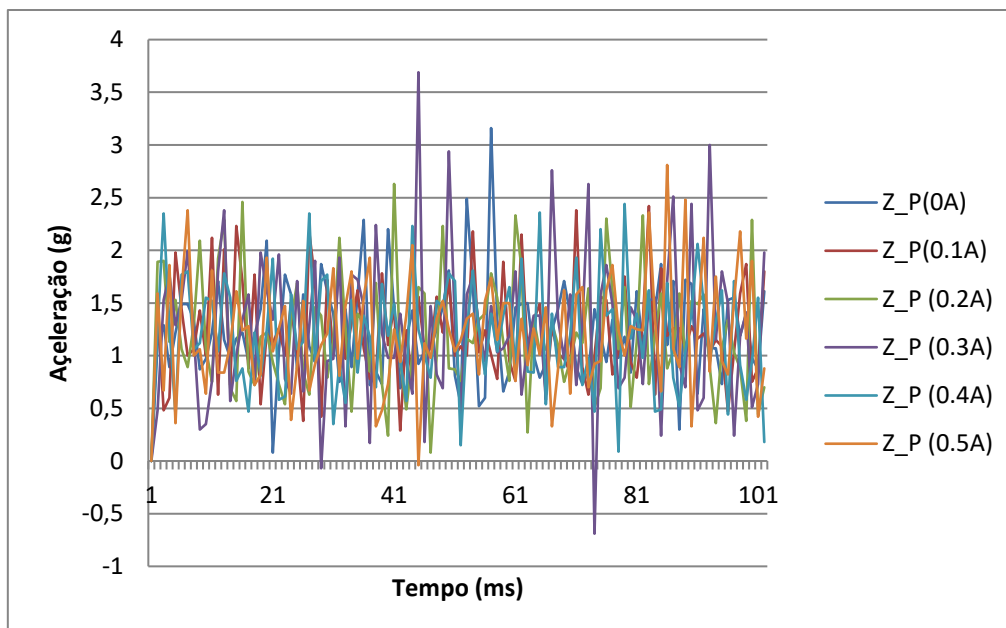


Figura 47 - Vibrações nos pedais da bicicleta.

Analisando a figura 47, pode-se observar que onde os pedais sofrem maior vibração são na quarta simulação, ou seja, quando é aplicada uma corrente de 0.3A e atingindo uma aceleração máxima de 3.69 g e onde os pedais sofrem menor vibração é quando se aplica uma corrente de 0.1A, atingindo uma aceleração máxima de 2.42 g. Na Tabela 3 são apresentadas as acelerações máximas e mínimas para todas as simulações.

Tabela 3 - Acelerações máximas e mínimas nos pedais.

Vibrações nos Pedais		
Ensaio	Máximos (g)	Aceleração Mínimos (g)
Z_V (0A)	3.16	0
Z_V (0.1A)	2.42	0
Z_V (0.2A)	2.63	0
Z_V (0.3A)	3.69	-0.69
Z_V (0.4A)	2.44	0
Z_V (0.5A)	2.81	-0.04

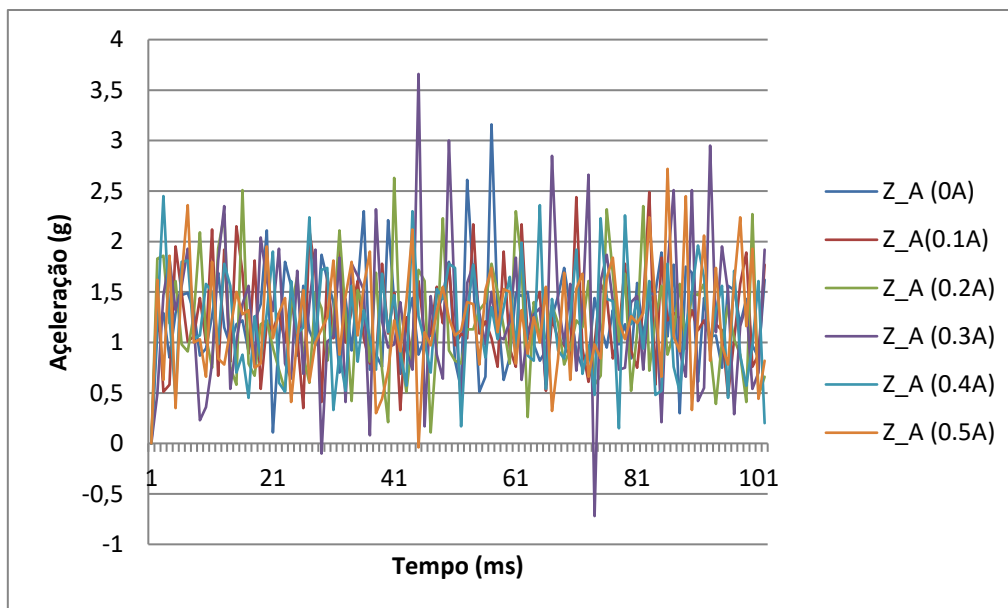


Figura 48 - Vibrações no assento da bicicleta.

Conforme se pode constatar na Figura 48, onde o assento sofre maior vibração é na quarta simulação, ou seja, quando se aplica uma corrente de 0.3A e atinge uma aceleração de 3.66 g e onde o assento sofre menor vibração é quando se aplica uma corrente de 0.4A, atingindo uma aceleração mínima de 2.45 g. Na Tabela 4 são apresentadas as acelerações máximas e mínimas no assento da bicicleta.

Tabela 4 - Acelerações máximas e mínimas no assento.

Vibrações no Assento		
Ensaio	Máximos (g)	Mínimos (g)
Z_V (0A)	3.16	0
Z_V (0.1A)	2.49	0
Z_V (0.2A)	2.63	0
Z_V (0.3A)	3.66	-0.72
Z_V (0.4A)	2.45	0
Z_V (0.5A)	2.72	-0.04

Por fim, após analisar todos os gráficos podemos concluir que onde a bicicleta sofre mais vibrações é no manípulo, pois é onde atinge o maior valor de aceleração, e onde a bicicleta sofre menos vibração é nos pedais, pois é onde o valor da aceleração máxima é mais pequena.

4.1.2. Piso liso

Nesta secção podemos observar os resultados obtidos nos vários ensaios efectuadas, ou seja, podemos observar as vibrações que a bicicleta sofre no manípulo, nos pedais e no assento. Os resultados são apresentados nas figuras 49, 50 e 51.

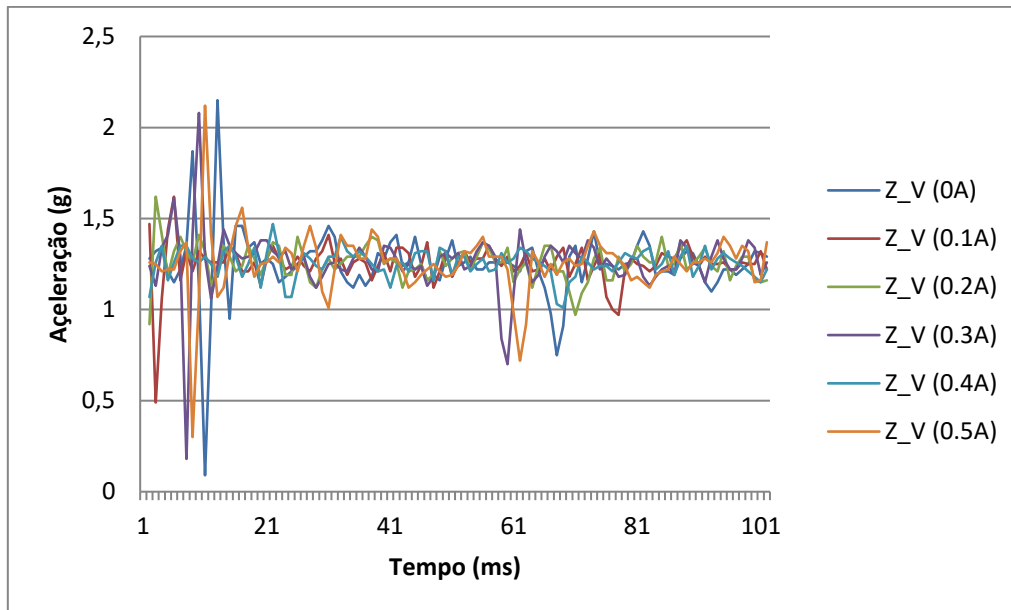


Figura 49 - Vibrações no manípulo da bicicleta.

Através da figura 49 é possível verificar que a influência da corrente aplicada no amortecedor é notória, pois os resultados diferem nos seis ensaios efectuados.

Também podemos observar que onde o manípulo sofre maior vibração é no primeiro ensaio, ou seja, quando aplicada uma corrente de 0A e atinge uma aceleração máxima de 2.15g e onde a vibração no manípulo é mínima é quando se aplica uma corrente de 0.4A, atingindo uma aceleração máxima de 1.47 g. Na Tabela 5 são apresentados as acelerações máximas e mínimas nos vários ensaios.

Tabela 5 - Acelerações máximas e mínimas no manípulo.

Vibrações no Manípulo		
Ensaio	Máximos (g)	Mínimos (g)
Z_V (0A)	2.15	0.09
Z_V (0.1A)	1.62	0.49
Z_V (0.2A)	1.62	0.62
Z_V (0.3A)	2.08	0.18
Z_V (0.4A)	1.47	1.01
Z_V (0.5A)	2.12	0.3

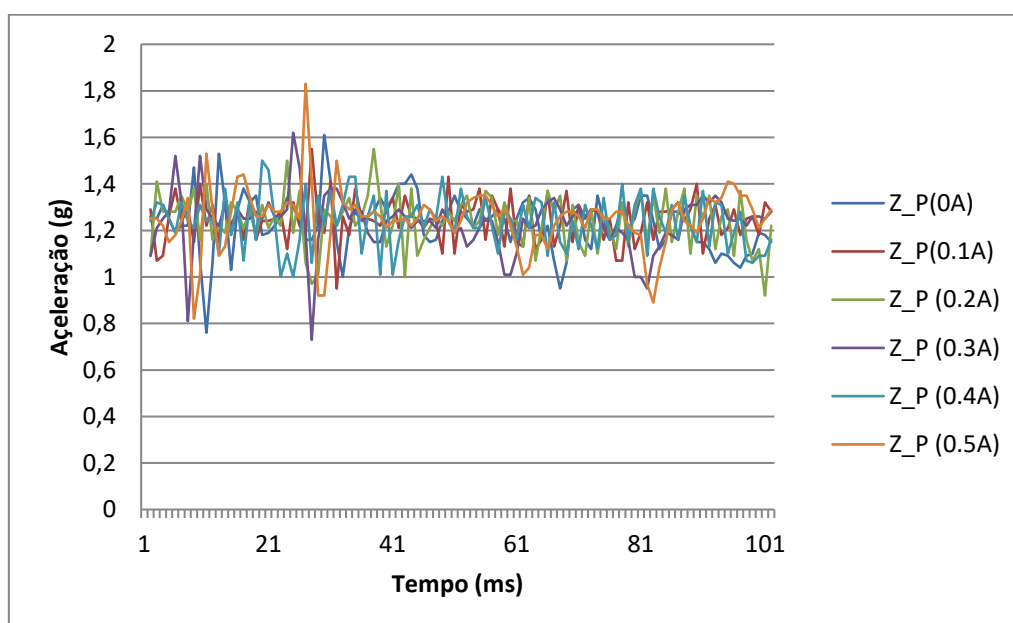


Figura 50 - Vibrações nos pedais.

Analisando a Figura 50, pode-se observar que onde as vibrações nos pedais são máximas é no último ensaio, ou seja, quando é aplicada uma corrente de 0.5A e atinge uma aceleração máxima de 1.83g. As vibrações nos pedais são mínimas quando é aplicada uma corrente de 0.4A e atinge uma aceleração máxima de 1.5 g. Na Tabela 6 são apresentadas as acelerações máximas e mínimas nos pedais da bicicleta.

Tabela 6 - Acelerações máximas e mínimas nos pedais.

Vibrações no Pedais		
Ensaio	Aceleração Máxima (g)	Aceleração Mínima (g)
Z_V (0A)	1.61	0.76
Z_V (0.1A)	1.55	0.95
Z_V (0.2A)	1.55	0.92
Z_V (0.3A)	1.62	0.73
Z_V (0.4A)	1.5	1
Z_V (0.5A)	1.83	0.82

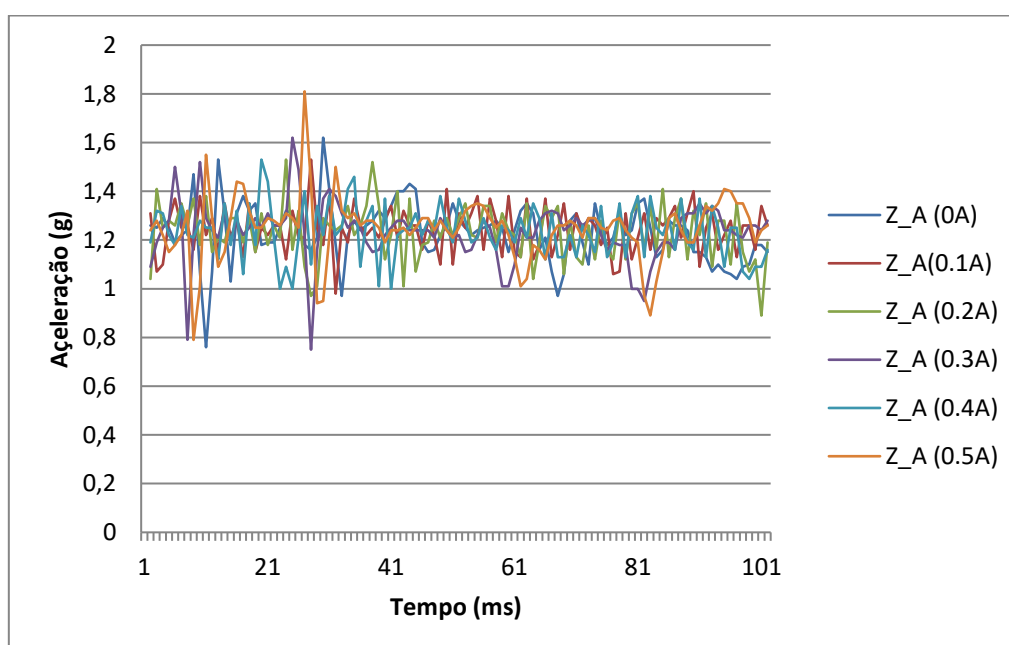


Figura 51 - Vibrações no assento.

Conforme se pode constatar na Figura 51, onde o assento sofre maior vibração é no último ensaio, quando é aplicada uma corrente de 0.5A e tem uma aceleração máxima de 1.81 g. Onde o assento da bicicleta sofre menor vibração é quando se aplica uma corrente de 0.1A, 0.2A e 0.4A, atingindo uma aceleração máxima de 1.53 g. Na Tabela 7 são apresentadas as acelerações máximas e mínimas em todos os ensaios feitos.

Tabela 7 - Acelerações máximas e mínimas no assento da bicicleta.

Vibrações no Assento		
Ensaio	Máximos (g)	Mínimos (g)
Z_V (0A)	1.62	0.76
Z_V (0.1A)	1.53	0.98
Z_V (0.2A)	1.53	0.89
Z_V (0.3A)	1.62	0.75
Z_V (0.4A)	1.53	1
Z_V (0.5A)	1.81	0.79

Por fim, após analisar todos os gráficos podemos concluir que onde a bicicleta sofre mais vibrações é no manípulo, pois é onde atinge o maior valor de aceleração.

Em relação as vibrações nos pedais e no assento, onde a bicicleta sofre mais vibrações é nos pedais, pois o valor da aceleração máxima é maior em relação ao valor da aceleração máxima nas vibrações do assento.

5. Modelo Numérico da Bicicleta

Nesta secção vai ser elaborado um modelo numérico em Simulink para simular o comportamento da bicicleta com o amortecedor MR implementado. A bicicleta é constituída por uma suspensão integral (dianteira e traseira), sendo apenas o amortecedor traseiro um amortecedor MR como se pode observar na figura 52.



Figura 52 - Bicicleta com suspensão integral e amortecedor MR.

Para fazer o modelo da bicicleta deve-se ter em conta vários factores, como se pode ver através da figura 53.

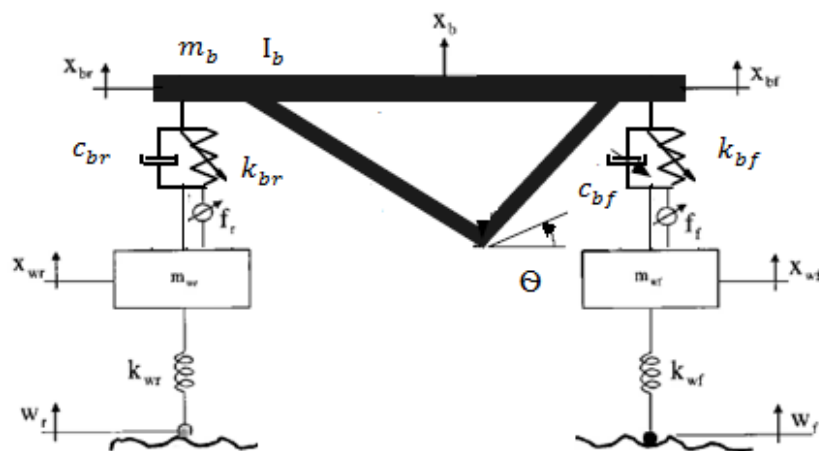


Figura 53 - Modelo da bicicleta.

De acordo com o modelo da Figura 53, I_b é o momento de inércia da bicicleta, m_b é a massa do quadro da bicicleta, m_{wf} e m_{wr} são a massa da roda da frente e da roda de trás respectivamente, X_b é o deslocamento vertical do quadro, x_{bf} e x_{br} são os deslocamentos verticais do quadro da bicicleta onde se encontra a suspensão dianteira e traseira, x_{wf} e x_{wr} são o deslocamento vertical da roda da frente e traseira da bicicleta, respectivamente.

Θ_0 é a rotação angular da bicicleta, f_f e f_r são forças da suspensão dianteira e traseira, respectivamente, w_f e w_r são as excitações da superfície da estrada, L_f e L_r são as distâncias desde o centro de gravidade do quadro da bicicleta até a roda da frente e até a roda traseira, respectivamente.

Os valores numéricos para os parâmetros do modelo são os seguintes: $K_{wf} = 152 \text{ KN/m}$, $K_{wr} = 152 \text{ KN/m}$, $K_{bf} = 10000 \text{ KN/m}$, $K_{br} = 6666.6 \text{ KN/m}$, $c_{bf} = 500 \text{ N}/(\frac{m}{s})$, $c_{br} = 400 \text{ N}/(\frac{m}{s})$, $L_f = 0.57 \text{ m}$, $L_r = 0.53 \text{ m}$, $m_{wf} = 2.141 \text{ Kg}$, $m_{wr} = 2.616 \text{ Kg}$, $m_b = 12.610 \text{ Kg}$, $\Theta_0 = 0.05 \text{ m}^4$ e $I_b = 600 \text{ kgm}^2$.

5.1. Equações de Equilíbrio

Considerando o modelo da bicicleta mostrado na Figura 53, as equações do movimento do modelo da bicicleta estão representadas em forma matricial como se segue (Sam, Osman, 2005):

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = Df + Ew \quad (3)$$

M- Matriz massa.

C- Matriz de amortecimento.

K- Matriz rigidez.

D- Matriz de estado.

E- Matriz de estado.

Onde o vector de estado, o vector de controlo e o vector de excitação são respectivamente dados por:

$$X = (x_{bf} \ x_{wf} \ x_{br} \ x_{wr})^T$$

$$f = (f_f \ f_r)^T$$

$$w = (\dot{w}_f \ w_f \ \dot{w}_r \ w_r)^T$$

As matrizes M, C, K, D e E são respectivamente dadas por:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{Lrmb}{L} & 0 & \frac{Lfmb}{L} & 0 \\ \frac{lb}{L} & 0 & \frac{-lb}{L} & 0 \\ 0 & mw_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & mwr \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} cbf & -cbf & cbr & -cbr \\ Lfcbf & -Lfcbf & -Lrcbr & Lrcbr \\ -cbf & cbf & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -cbr & cbr \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K = \begin{bmatrix} Kbf & -Kbf & Kbr & -Kbr \\ LfKbf & -LfKbf & -LrKbr & LrKbr \\ -Kbf & Kbf + Kw_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Kbr & Kbr + Kw_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ Lf & -Lr \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ Kwf & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Kwr & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

5.2. Espaço de estado

O modelo da equação (3) pode ser reescrito na forma de espaço de estado, onde A , B e B_p são matrizes de estado, $z(t)$ e $u(t)$ são a entrada de perturbação e a entrada de controlo, respectivamente, e representa-se da seguinte forma:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + B_p z(t) \quad (9)$$

Onde :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ Ap1 & Ap2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

As matrizes A_{p_1} e A_{p_2} uma vez que são matrizes muito extensas , foram divididas em duas partes.

$$A_{p_1} = \begin{bmatrix} \frac{-Lkbf}{mb(Lf + Lr)} - \frac{Lf^2Lkbf}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lkbf}{mb(Lf + Lr)} + \frac{Lf^2Lkbr}{Ib(Lf + Lr)} \\ \frac{Kbf}{mwf} & \frac{-(kbf + Kwf)}{mwf} \\ \frac{-Lkbf}{mb(Lf + Lr)} + \frac{LfLrLkbf}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lkbf}{mb(Lf + Lr)} - \frac{LfLrLkbf}{Ib(Lf + Lr)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-Lkbr}{mb(Lf + Lr)} + \frac{LfLLrkbr}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lkbr}{mb(Lf + Lr)} - \frac{LfLLrkbr}{Ib(Lf + Lr)} \\ 0 & 0 \\ \frac{Lkbr}{mb(Lf + Lr)} - \frac{Lr^2Lkbr}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lkbr}{mb(Lf + Lr)} + \frac{Lr^2Lkbr}{Ib(Lf + Lr)} \\ \frac{kbr}{mwr} & \frac{-(kbr + kwr)}{mwr} \end{bmatrix}$$

$$A_{p_2} = \begin{bmatrix} \frac{-Lcbf}{mb(Lf + Lr)} - \frac{Lf^2Lcbf}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lcbf}{mb(Lf + Lr)} + \frac{Lf^2Lcbr}{Ib(Lf + Lr)} \\ \frac{cbf}{mwf} & \frac{-cbf}{mwf} \\ \frac{-Lcbf}{mb(Lf + Lr)} + \frac{LfLrLcbf}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lcbf}{mb(Lf + Lr)} - \frac{LfLrLcbf}{Ib(Lf + Lr)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-Lcbr}{mb(Lf + Lr)} + \frac{LfLLrcbr}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lcbr}{mb(Lf + Lr)} - \frac{LfLLrcbr}{Ib(Lf + Lr)} \\ 0 & 0 \\ \frac{-Lcbr}{mb(Lf + Lr)} - \frac{Lr^2Lcbr}{Ib(Lf + Lr)} & \frac{Lcbr}{mb(Lf + Lr)} + \frac{Lr^2Lcbr}{Ib(Lf + Lr)} \\ \frac{cbr}{mwr} & \frac{-cbr}{mwr} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix}
0 & & & 0 \\
0 & & & 0 \\
0 & & & 0 \\
0 & & & 0 \\
\frac{L}{mb(Lr + Lf)} + \frac{Lf^2L}{Ib(Lr + Lf)} & & \frac{L}{mb(Lr + Lf)} - \frac{LfLLr}{Ib(Lr + Lf)} & \\
\frac{-1}{mwf} & & & 0 \\
\frac{L}{mb(Lr + Lf)} - \frac{LfLLr}{Ib(Lr + Lf)} & & \frac{L}{mb(Lr + Lf)} + \frac{Lr^2L}{Ib(Lr + Lf)} & \\
0 & & & \frac{-1}{mwr}
\end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_p = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{kwf}{mwf} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{kwr}{mwr} & 0
\end{bmatrix} \quad (12)$$

5.3. Simulação do comportamento dinâmico do sistema

Foi construído um modelo em Simulink através do qual é possível fazer uma previsão do comportamento dinâmico da bicicleta já com o amortecedor MR RD-1005-3 modelo Bingham implementado. Na figura 54 está representado o modelo criado no Simulink.

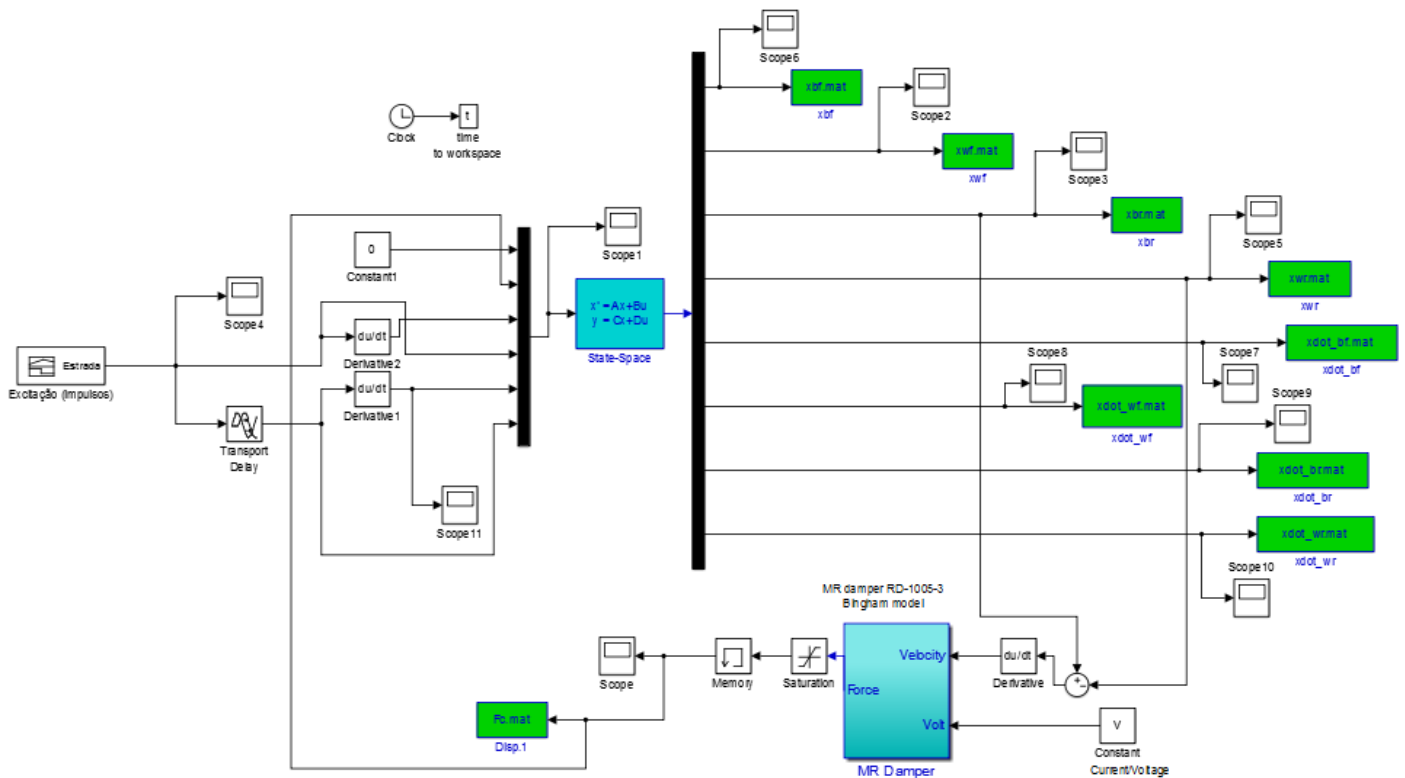


Figura 54 - Modelo em Simulink.

Com o modelo apresentado na Figura 54 foram realizadas seis simulações, nestas simulações o amortecedor foi submetido com diferentes valores de corrente sendo eles: 0A, 0.1A, 0.2A, 0.3A, 0.4A e 0.5A. Os resultados obtidos são apresentados no seguinte subcapítulo.

Nas diversas simulações foi usada uma excitação de entrada $w(t)$ de forma a simular o piso de uma estrada. A excitação possui três impulsos, sendo o primeiro impulso no sentido positivo igual a 0.02m no intervalo $1 \leq t \leq 1.1s$. O segundo impulso ocorre no sentido positivo igual a 0.0038m no intervalo $1.9 \leq t \leq 2s$. Por fim, o último impulso ocorre no sentido positivo igual a 0.02m no intervalo $2.9 \leq t \leq 3s$.

O tempo de simulação utilizado é de 10 segundos de modo a ser possível observar a estabilização do sistema, como se pode observar na Figura 55.

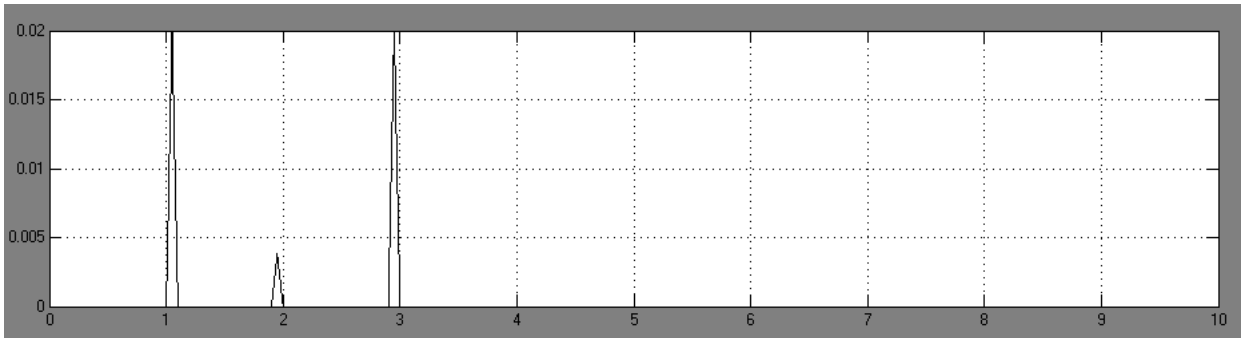


Figura 55 - Excitação para simular um piso de estrada irregular.

5.4. Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do modelo criado no simulink, ou seja, são apresentados os deslocamentos e as velocidades que a bicicleta sofre, com diferentes valores de corrente. Os resultados são apresentados nas seguintes Figuras.

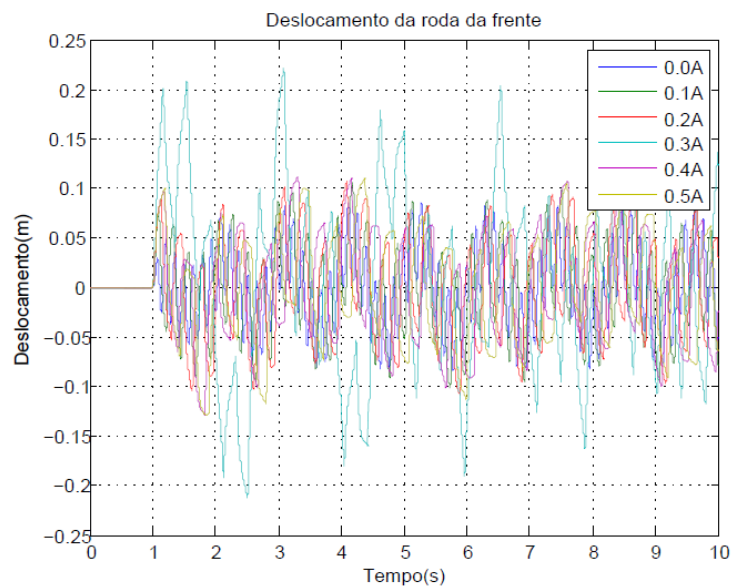


Figura 56 - Deslocamento na roda da frente.

Analisando a Figura 56, pode-se observar que onde a roda da frente sofre maior deslocamento é na quarta simulação, ou seja, quando é aplicada uma corrente de 0.3A e

atinge um deslocamento de 0.2213 m e onde a roda da frente sofre menor deslocamento é quando o amortecedor não tem corrente e atinge um deslocamento máximo de 0.0862. Na tabela 8 são apresentados os deslocamentos máximos e mínimos que a roda da frente da bicicleta sofre em cada simulação.

Tabela 8 - Deslocamentos máximos e mínimos na roda da frente da bicicleta.

Simulação	Deslocamento na Roda da Frente	
	Máximo (m)	Mínimo (m)
0A	0.0862	-0.0843
0.1A	0.1056	-0.1018
0.2A	0.1067	-0.1087
0.3A	0.2213	-0.2128
0.4A	0.1111	-0.129
0.5A	0.1109	-0.1289

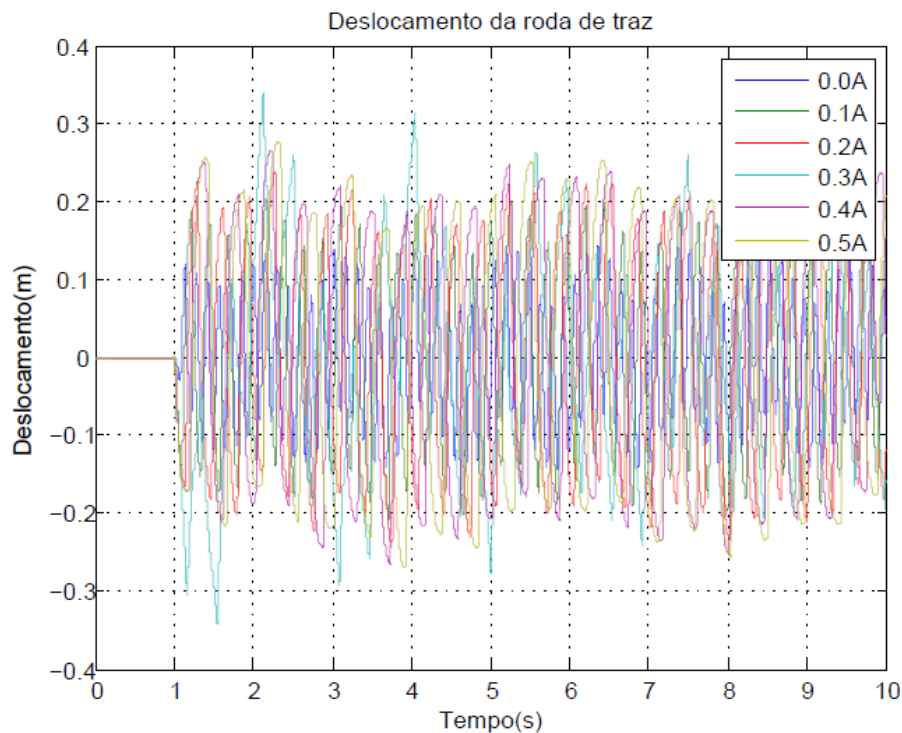


Figura 57 - Deslocamento na roda de traz.

Através da Figura 57, podemos verificar que os resultados são bastantes semelhantes, havendo uma pequena diferença quando é aplicada uma corrente de 0.3A.

É quando aplicada uma corrente de 0.3A que a roda traseira sofre maior deslocamento e atinge um deslocamento máximo de 0.3407 m e é na primeira simulação que sofre menor deslocamento, atingindo um deslocamento máximo de 0.1451 m. Na Tabela 9 são apresentados os deslocamentos máximos e mínimos das varias simulações efectuadas.

Tabela 9 - Deslocamentos máximos e mínimos na roda traseira da bicicleta.

Simulação	Deslocamento na Roda Traseira	
	Máximo (m)	Mínimo (m)
0A	0.1451	-0.1461
0.1A	0.2055	-0.2088
0.2A	0.2404	-0.2434
0.3A	0.3407	-0.3416
0.4A	0.2662	-0.2655
0.5A	0.278	-0.2705

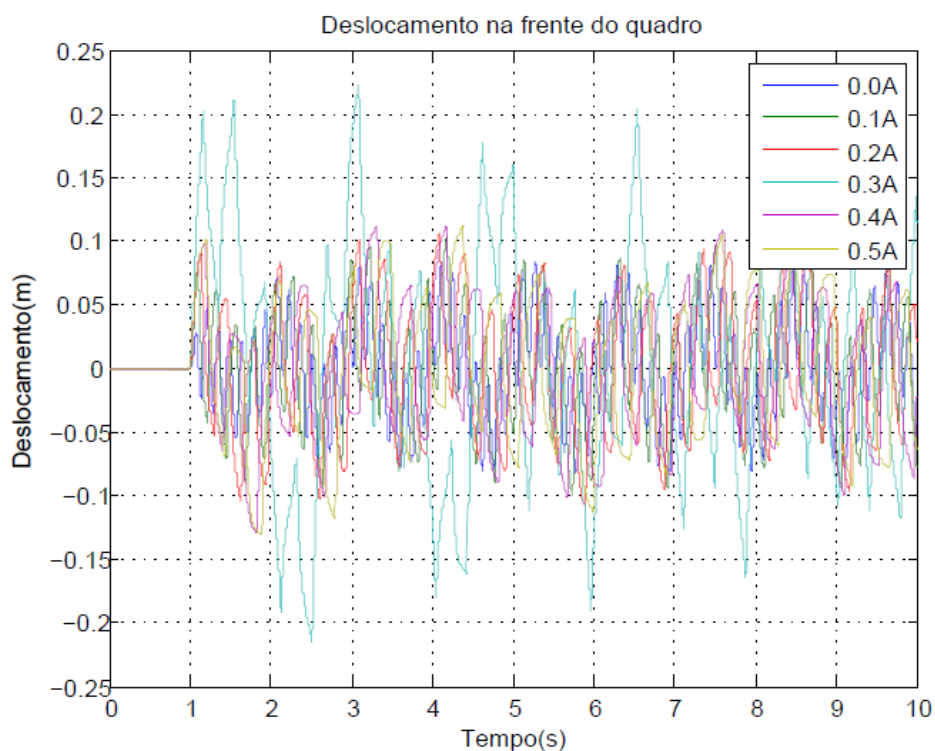


Figura 58 - Deslocamento na frente do quadro.

Conforme se pode verificar na Figura 58, o deslocamento máximo na parte da frente do quadro acontece quando se aplica uma corrente de 0.3A e atinge um deslocamento de 0.2235 m e onde sofre menor deslocamento é quando o amortecedor não tem corrente e atinge um deslocamento máximo de 0.0844 m. Através da tabela 10, podem-se ver os deslocamentos máximos e mínimos em cada simulação.

Tabela 10 - Deslocamentos máximos e mínimos na frente do quadro.

Simulação	Deslocamento na Frente do Quadro	
	Máximo (m)	Mínimo (m)
0A	0.0844	-0.0827
0.1A	0.1045	-0.1004
0.2A	0.1062	-0.1086
0.3A	0.2235	-0.215
0.4A	0.112	-0.133
0.5A	0.112	-0.132

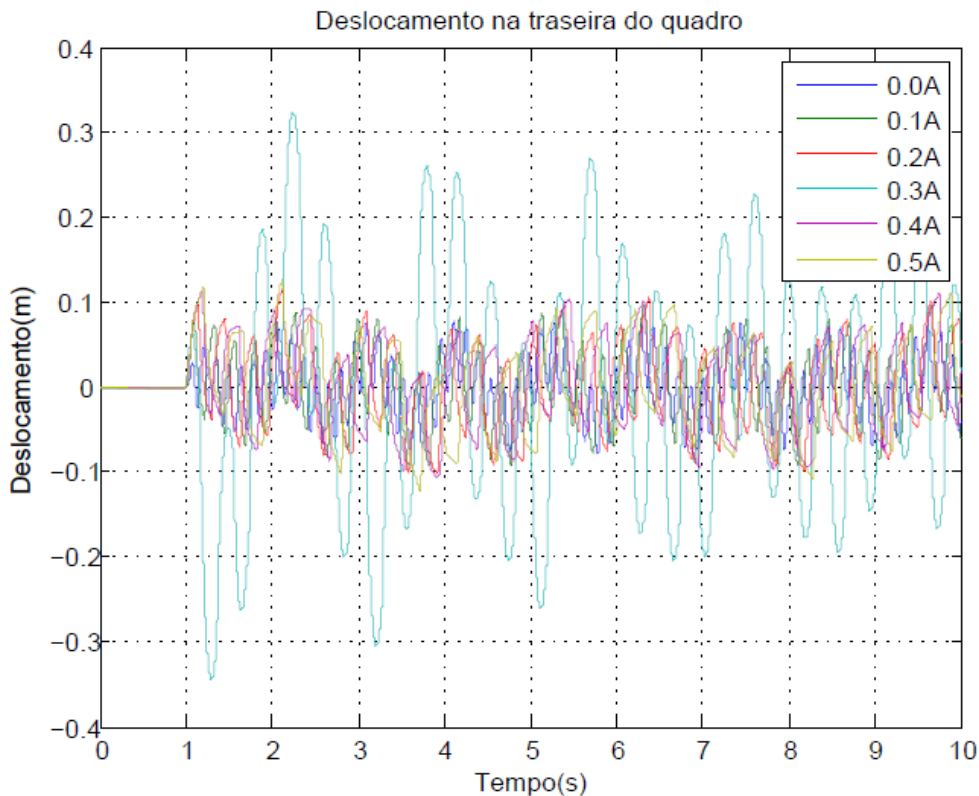


Figura 59 - Deslocamento na traseira do quadro.

Analisando a Figura 59, verifica-se que onde a traseira sofre maior deslocamento é na quarta simulação, isto é, quando é aplicada uma corrente de 0.3 no amortecedor MR e sofre um deslocamento de 0.325 m e onde a traseira do quadro sofre menor deslocamento é na primeira simulação, atingindo um deslocamento máximo de 0.0784 m. Na seguinte Tabela podem ser vistos os deslocamentos que a bicicleta sofre na traseira do quadro nas seis simulações feitas.

Tabela 11 - Deslocamentos máximos e mínimos na traseira do quadro da bicicleta.

Simulação	Deslocamento na Traseira do Quadro	
	Máximo (m)	Mínimo (m)
0A	0.0784	-0.0785
0.1A	0.0976	-0.0965
0.2A	0.1158	-0.1028
0.3A	0.325	-0.3443
0.4A	0.1127	-0.1057
0.5A	0.1272	-0.1233

Analisando, no geral todos os deslocamentos, podemos concluir que onde a bicicleta sofre maior deslocamento é na roda traseira da bicicleta, atingindo um deslocamento máximo de 0.3407 m e onde a bicicleta sofre o menor deslocamento é na traseira do quadro, atingindo um deslocamento máximo de 0.0784 m.

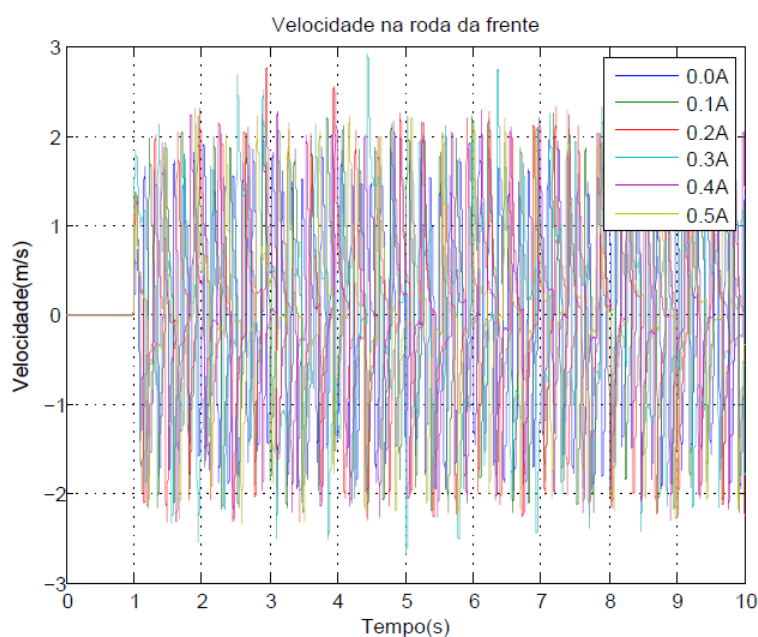


Figura 60 - Velocidade na roda da frente.

Através da Figura 60, pode-se verificar que onde a roda da frente atinge maior velocidade é na quarta simulação, isto é, quando é aplicada uma corrente de 0.3A, atingindo uma velocidade máxima de 2.9234 m/s e onde a roda da frente atinge menor velocidade é na primeira simulação, ou seja, quando não há corrente no amortecedor MR e atinge uma velocidade máxima de 2.0173 m/s. Na Tabela 12 são apresentados as velocidades máximas e mínimas em cada simulação.

Tabela 12 - Velocidade máximas e mínimas na roda da frente.

Simulação	Velocidade na Roda da Frente	
	Máximos (m/s)	Mínimos (m/s)
0A	2.0173	-1.9837
0.1A	2.2521	-2.2633
0.2A	2.762	-2.3254
0.3A	2.9234	-2.697
0.4A	2.5005	-2.3523
0.5A	2.3156	-2.3341

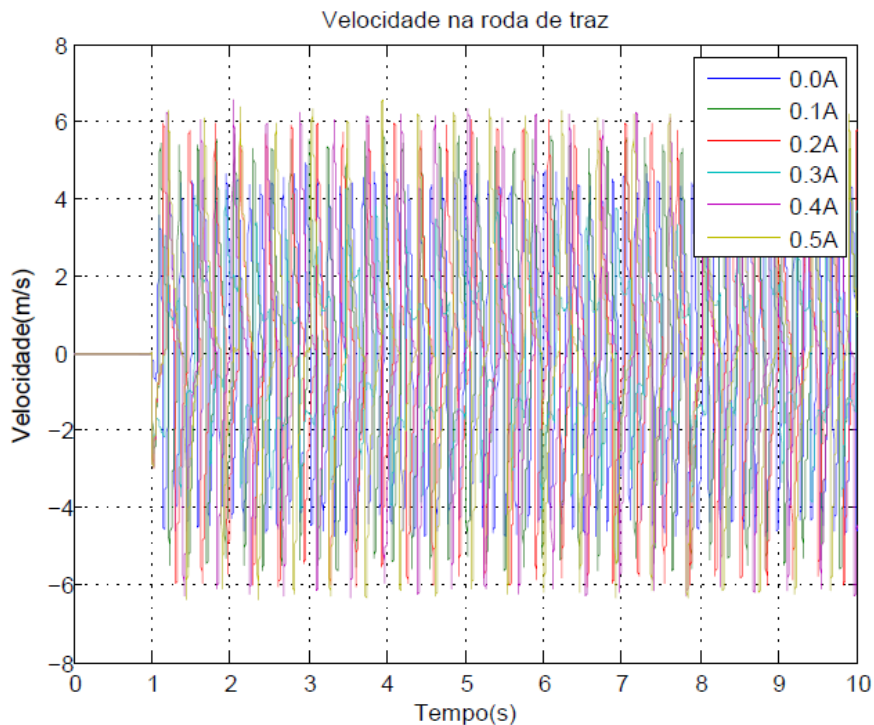


Figura 61 - Velocidade na roda de trás.

Analisando a Figura 61, verifica-se que onde a roda traseira atinge maior velocidade é quando se aplica uma corrente de 0.5 A, atingindo uma velocidade máxima de 6.5609 m/s e onde a roda traseira atinge menor velocidade é quando se aplica uma corrente de 0.3A e atinge uma velocidade de 4.2582 m/s. Na Tabela 13 apresentam-se as velocidades máximas e mínimas que a roda atinge em cada simulação.

Tabela 13 - Velocidade máximas e mínimas na roda traseira.

Simulação	Velocidade na Roda traseira	
	Máximos (m/s)	Mínimos (m/s)
0A	4.9521	-4.2475
0.1A	5.7649	-5.6558
0.2A	6.0671	-6.0442
0.3A	4.2582	-4.0659
0.4A	6.5526	-6.3287
0.5A	6.5609	-6.395

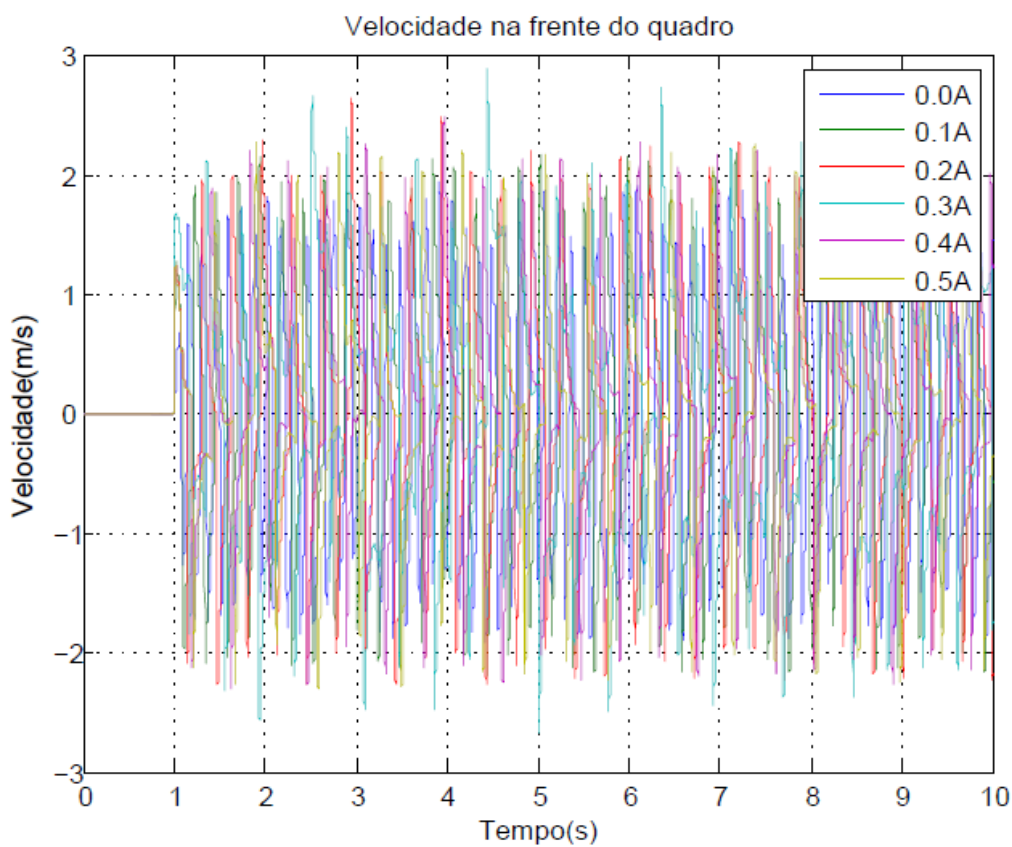


Figura 62 - Velocidade na frente do quadro.

Pela Figura 62, pode verificar-se que onde a parte da frente do quadro atinge maior velocidade é na quarta simulação, atingindo uma velocidade máxima de 2.8915 m/s e onde a parte da frente do quadro atinge menor velocidade é quando o amortecedor MR não tem corrente, atingindo uma velocidade de 1.9322 m/s. Na seguinte tabela apresentam-se as velocidades que a parte da frente do quadro atinge.

Tabela 14 - Velocidades máximas e mínimas na parte da frente do quadro.

Simulação	Velocidade na Frente do Quadro	
	Máximos (m/s)	Mínimos (m/s)
0A	1.9322	-1.9129
0.1A	2.1883	-2.1999
0.2A	2.6403	-2.2796
0.3A	2.8915	-2.6787
0.4A	2.4828	-2.3042
0.5A	2.2708	-2.3136

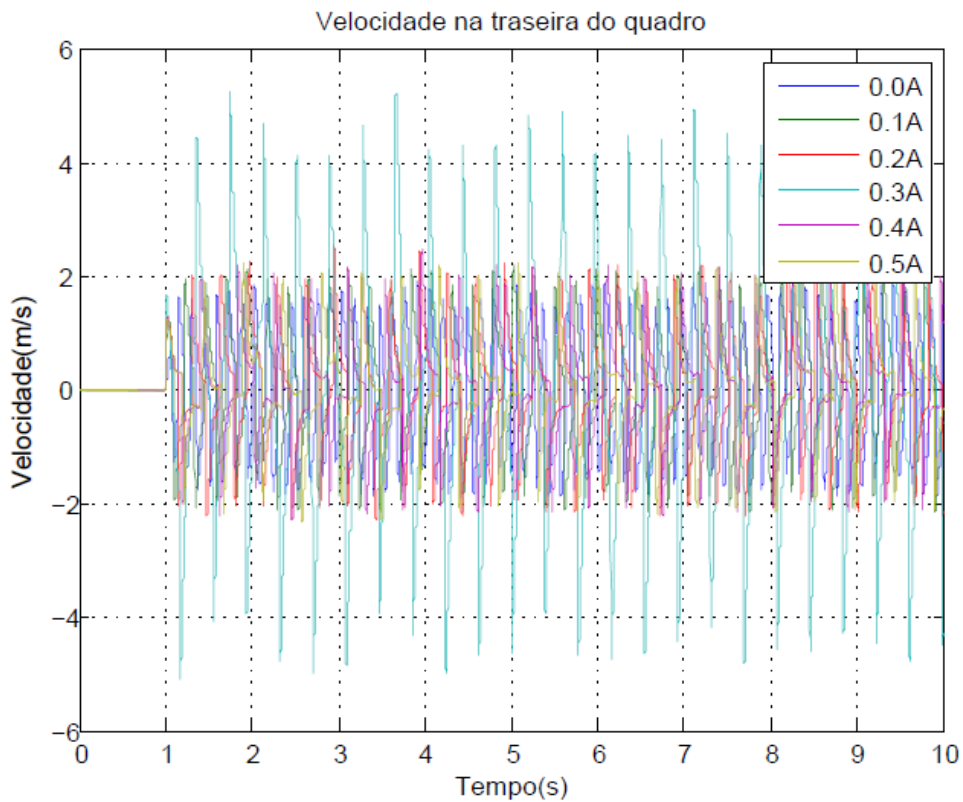


Figura 63 - Velocidade na traseira do quadro.

Analisando a Figura 63, verifica-se que onde a traseira do quadro atinge maior velocidade é quando se aplica uma corrente de 0.3 A e atinge uma velocidade máxima de 5.2383 m/s e onde a roda traseira atinge menor velocidade é quando não se aplica corrente no amortecedor MR e atinge uma velocidade máxima de 1.9195 m/s. Na Tabela 15, apresentam-se as velocidades máximas e mínimas que a traseira do quadro atinge em cada simulação efectuada.

Tabela 15 - Velocidades máximas e mínimas na traseira do quadro da bicicleta.

Simulação	Velocidade na Traseira do Quadro	
	Máximos (m/s)	Mínimos (m/s)
0A	1.9195	-1.9053
0.1A	2.1758	-2.1662
0.2A	2.5473	-2.2922
0.3A	5.2383	-5.1189
0.4A	2.469	-2.3079
0.5A	2.2236	-2.3397

Analisando, no geral todas as velocidade a que a bicicleta se sujeita, podemos concluir que onde a bicicleta atinge maior velocidade é na roda traseira da bicicleta, atingindo uma velocidade máximo de 6.5609 m/s e onde a bicicleta atinge menor velocidade é na traseira do quadro, atingindo uma velocidade máxima de 1.9195 m/s.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Com o desenvolvimento do trabalho apresentado, foi possível alcançar todos os objectivos definidos inicialmente.

Através dos resultados experimentais obtidos, conclui-se que a influência da corrente aplicada no amortecedor MR é notória, pois todas as simulações efectuadas diferem. Em relação aos resultados obtidos no piso irregular (paralelos), conclui-se que onde a bicicleta BTT vai sofrer maior vibração em relação ao manípulo, pedais e assento é no manípulo, ou seja, é onde a bicicleta atinge um valor de aceleração mais alto. Também se concluí que onde sofre menor vibração é nos pedais, pois é onde a aceleração máxima atinge o valor mais pequeno. Em relação ao piso liso, pode-se concluir que também é no manípulo da bicicleta onde sofre mais vibrações e também é nos pedais que sofre menos vibração.

Uma vez que o piso irregular se encontra mais danificado do que o piso liso, como era de esperar conclui-se que é no pavimento irregular onde a bicicleta vai sofrer mais vibrações, tanto nos pedais, no assento e no manípulo.

Na fase da modelação numérica foi possível simular o comportamento do amortecedor magnetico-reológico o qual varia essencialmente com a corrente que é aplicada.

Pelos resultados obtidos no Simulink, conclui-se que onde a bicicleta vai sofrer maior deslocamento em relação a roda traseira, roda dianteira, parte da frente do quadro e traseira do quadro é na roda traseira, pois é onde atinge o deslocamento máximo. Também se concluí que é na traseira do quadro que sofre menor deslocamento.

Em relação aos resultados das velocidades obtidas, conclui-se que é na roda traseira da bicicleta que atinge maior velocidade, atingindo uma velocidade de 6.5609 m/s. Também se conclui que onde a bicicleta atinge menor velocidade é na traseira do quadro, atingindo uma velocidade de 1.9195 m/s.

Por fim, de um modo geral, conclui-se que a bicicleta BTT tem um bom desempenho com o amortecedor magnetico-reológico implementado.

6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base no presente estudo sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- desenvolvimento de um controlador semi-activo.
- aplicação do controlador à bicicleta (controlo do tempo real do amortecimento).
- verificação do comportamento da suspensão semi-activa para várias condições (vários tipos de pavimento).
- estudo de várias metodologias de controlo (controlo óptimo, robusto e difuso) e comparação do desempenho de cada controlador na redução das vibrações na bicicleta.

Referências Bibliográficas

Almeida, A. C. R., 2002. *Simulação e Controle de um Sistema de Suspensão Simplificado*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ashfak, A., Rasheed, A., Jaleel, J., 2009. *Design, Fabrication and Evaluation of MR Damper*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:3, No:5, 2009.

Bombard, A. J. F., 2005. *Suspensões Magneto-Reológicas de pós de ferro carbonilo: um estudo da influência das propriedades magnéticas e do tamanho das partículas*. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Química.

Carneiro, R. B., 2009. *Controle Semi-ativo de Vibrações em Estruturas Utilizando Amortecedores Magnetorreológico*. Brasília: Universidade de Brasília.

Carlson, J. D. What makes a good MR fluid. In: International Conference on Electrorheological Fluids and Magneto-Rheological Suspension and Their Applications, 8., 2001, Nice. Proceedings. New Jersey; World Scientific, 2002.

Costa, E. L. M. d., 2008. *Construção de um Dispositivo Amortecedor Magnetorreológico para uma Suspensão Activa*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Crivellaro, C., 2008. *Controle Robusto de Suspensão Semi-ativa para Caminhonetes Utilizando Amortecedores Magneto-reológicos*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Freitas, L. M. P., 2006. *Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Macpherson*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Genç, S. Synthesis and properties of magnetorheological (MR) fluids. 2002. 168p. Tese (Doutorado) - School of Engineering of University of Pittsburg, Pittsburg, 2002.

Kotinda, G. I. & Júnior, V. S., 2003. Estruturas Inteligentes: Fluido Magneto-reológico. *13º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Volume 13.

Lima, A. S. d., 2011. *Identificação Experimental de um Sistema Magneto-Reológico*. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.

Louam, N., 2013. Les fluides rhéologique intelligents et leurs applications énergétiques et technico-industrielles. *Revue des Energies Renouvelables*, 16(4), pp. 641-656.

Merling, M. C. C., 2007. *Uma abordagem gerencial para o procedimento de projeto de suspensões de veículos terrestres*. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Moura, E. D. A., 2003. *Estudo de Suspensões Passiva, Semi-Activa MR e Ativa*. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá.

Neto, C. M., 2008. *Atenuação de Vibração Estrutural Utilizando Fluido Magnetoreológico*. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista.

Paschoal, E. F., 2011. *Controle Semi-ativo de Vibrações Usando Lógica Nebulosa e Fluido Magnetoreológico*. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista.

Pascoal, A., 2016. Prototipagem e Análise do conforto na condução de uma bicicleta equipada com um amortecedor Magneto-Reológico. Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial. Bragança: Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Sam, Y., Osman, J., 2005. *MODELING AND CONTROL OF THE ACTIVE SUSPENSION SYSTEM USING PROPORTIONAL INTEGRAL SLIDING MODE APPROACH*, Vol.7, No.2, 2005.

Santos, P. M. S., 2011. *Sistemas de Protecção Sísmica Semi-Activos Aplicados Em Estruturas de Engenharia Civil*. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa.

Sleiman, H., 2010. *Systèmes de Suspension Semi-active à Base de Fluide Magnétorhéologique pour L'automobile*. Paris: École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

Tusset, Â. M., 2008. *Controle Ótimo Aplicado em Modelo de Suspensão Veicular Não-linear Controlada Através de Amortecedor Magneto-reológico*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Anexos

Anexo 1 - Desenhos definição.

1.1. Anilha

17.29

R5

R18

B

C

D

E

F

1

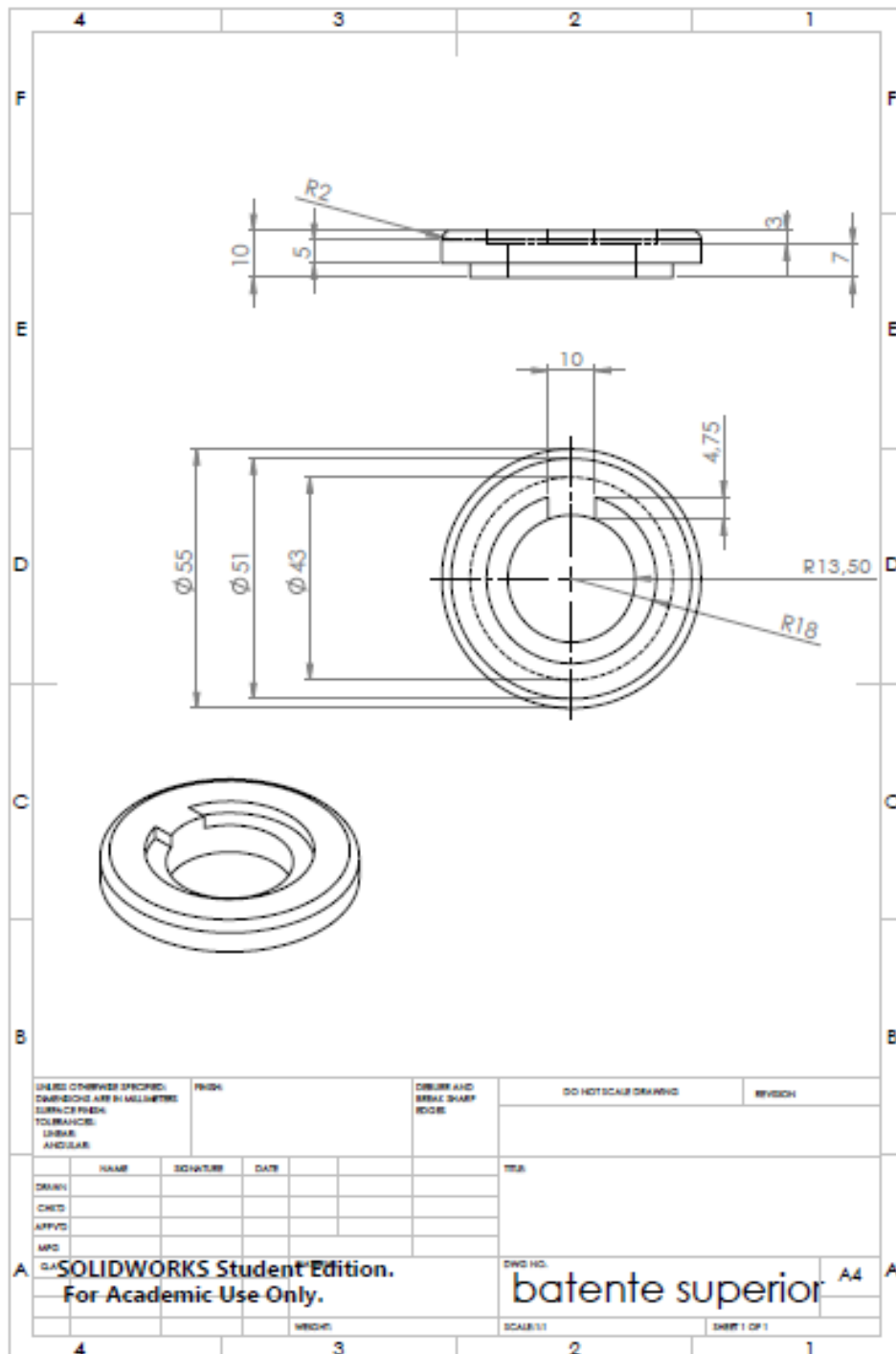
2

3

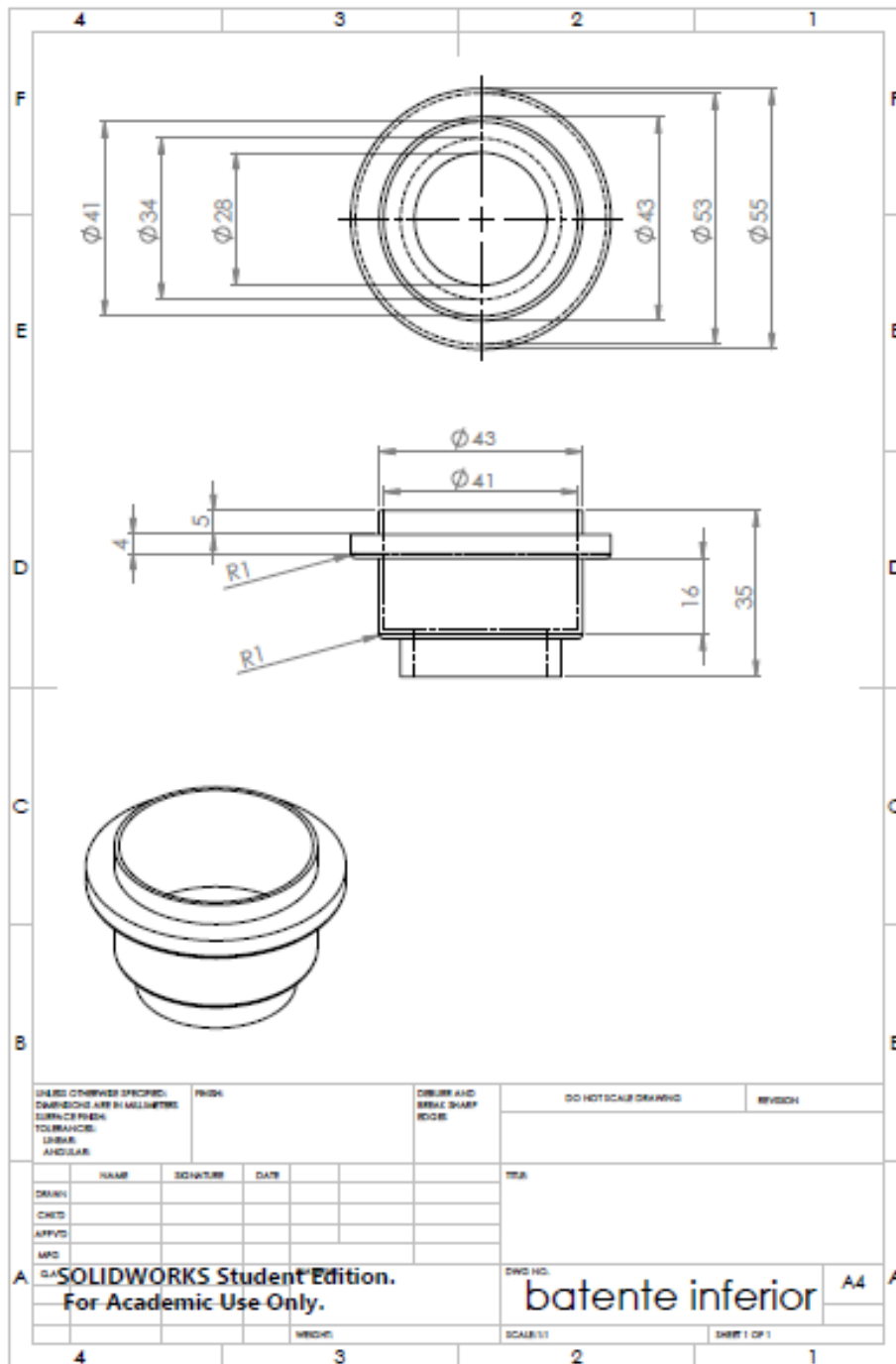
4

SHEET CONTAINS SPECIFIC DIMENSIONS ARE IN MILLIMETRES SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR ANGULAR		FINISH	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME DRAWN CHECKED APPROVED MFD	SIGNATURE	DATE	TITLE	DWG NO. anilha	
SOLIDWORKS Student Edition. For Academic Use Only.			SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1	A4

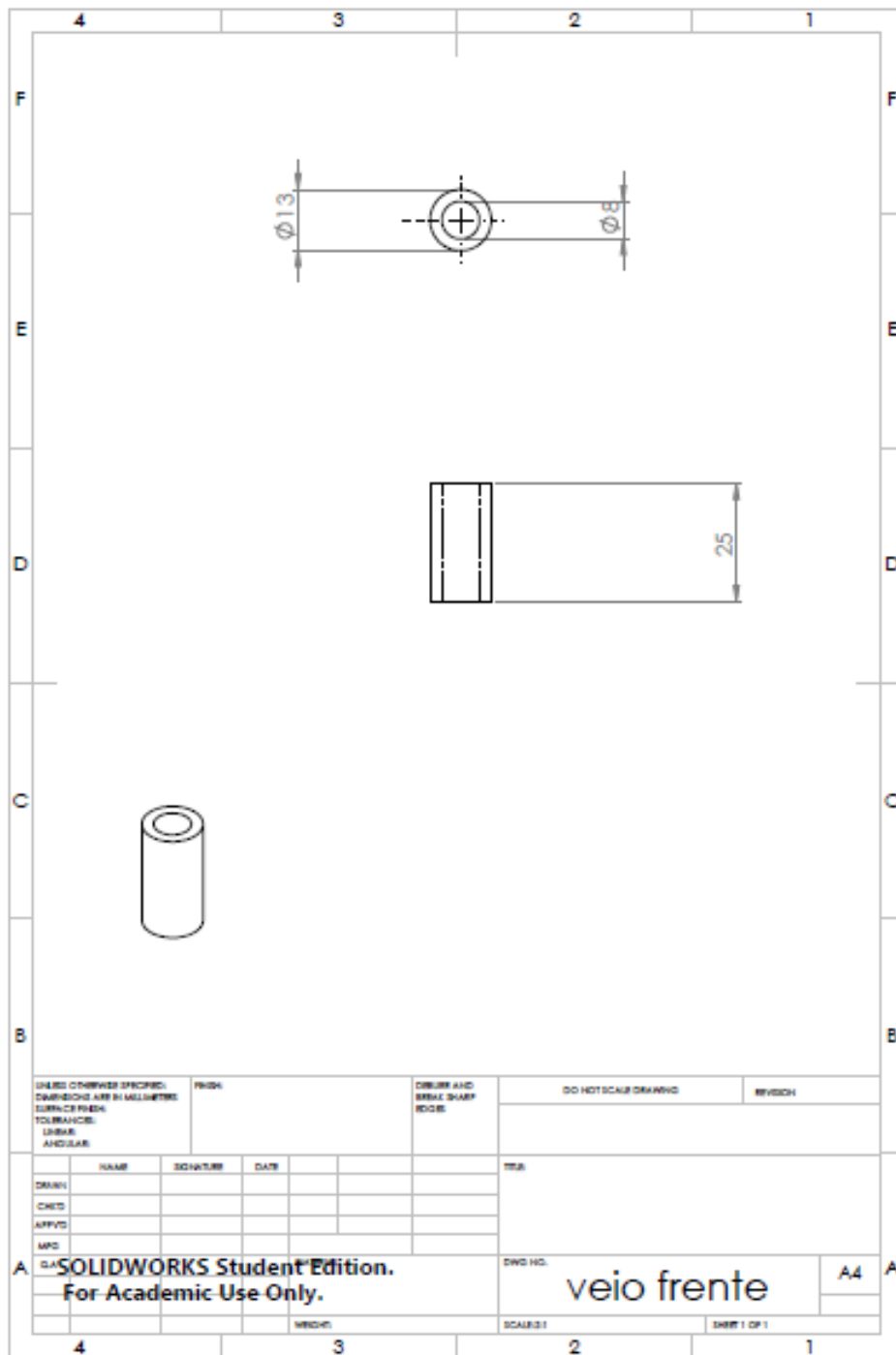
1.2. Batente Superior



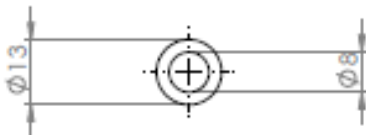


1.3. Batente Inferior



1.4. Veio da Frente



1.5. Veio Traseiro

4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
<small>UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:</small>		<small>FRISKI</small>	<small>DRAWN AND BREAK SHARP EDGE</small>
		<small>DO NOT SCALE DRAWING</small>	<small>REVISION</small>
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE
CHECKED			
APPROVED			
MPO			
SOLIDWORKS Student Edition. For Academic Use Only.		<small>DWG NO.</small> veio traseiro	
		<small>SCALE: 1:1</small>	<small>SHEET 1 OF 1</small>
4	3	2	1
A			A