



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Carlos Santos Ferreira

Projeto e desenvolvimento de um sistema de regeneração da energia de amortecimento em suspensões de veículos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Carlos Santos Ferreira

Projeto e desenvolvimento de um sistema de
regeneração da energia de amortecimento
em suspensões de veículos

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Eurico Seabra

e da co-orientação
Professor Doutor José Meireles

DECLARAÇÃO

Nome João Carlos Santos Ferreira;

Endereço eletrónico: a46989@alunos.uminho.pt;

Tlm: 918378172;

Número do Bilhete de Identidade: 12964937;

Título dissertação projeto e desenvolvimento de um sistema de regeneração da energia de amortecimento em suspensões para veículos;

Orientador(es): Professor Doutor Eurico Augusto Rodrigues Seabra; Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles

Ano de conclusão: 2013;

Designação do Mestrado: Ciclo de Estudos Integrado Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica;

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respetiva, deve constar uma das seguintes declarações:

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todas as pessoas pelo apoio, encorajamento e assistência demonstrada no desenvolvimento da minha dissertação.

Em especial gostava de agradecer aos meus pais, irmã e avó o apoio, incentivo, aconchego e muita paciência que evidenciaram ao longo da minha vida e carreira académica, sem eles e sem a sua ajuda financeira não teria conseguido.

Congratulo publicamente a minha enorme reverência e admiração pelos Professores Doutores Eurico Augusto Rodrigues Seabra e José Filipe Bizarro Meireles, agradeço por terem aceitado serem meus orientadores da dissertação, por me terem imprimido um espírito crítico, e pela sua disponibilidade ao longo de todo o trabalho.

Agradeço à Universidade do Minho por me ter facultado os meios necessários ao desenvolvimento de um conjunto de aptidões durante a minha vida académica e espero que nunca se rompa esta ligação no futuro.

Também agradeço aos meus colegas de curso Tiago Costa, Adão Mendes todo o apoio disponibilizado e aproveito a oportunidade para lhes desejar um futuro jubiloso.

Brindo a Deus por me ter criado porque sem ele não teria todas estas minhas aptidões e não poderia dar o meu contributo para um mundo melhor.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo, desenvolvimento e conceção de um sistema de regeneração de energia de amortecimento em suspensões de veículos. A sua realização prende-se com uma necessidade específica de reduzir o consumo de combustíveis, devido ao aumento dos custos destes e reduzir a dependência do petróleo, adotando sistemas mais económicos e ecológicos.

Embora se depreenda que o amortecimento das suspensões de veículos é um movimento inerente ao seu bom funcionamento, o trabalho que o amortecedor realiza é dissipado sob forma de energia térmica. O uso de sistemas de suspensões regenerativas vem reformular o funcionamento das suspensões, permitindo-lhes serem elementos geradores de energia. Neste trabalho, aborda-se a regeneração de energia através de um sistema hidráulico, integrado num amortecedor adaptado, utilizando o acumulador como forma de armazenamento de energia.

O sistema construído foi submetido a testes para avaliar a energia obtida a partir da acumulação de óleo em acumuladores de 5 l e 10 l, em veículos movidos a gasóleo ou gasolina, em estradas de tipologia boa, média e pobre.

Verificou-se que o tamanho diferente entre acumuladores influencia o tempo de enchimento e o volume de óleo inserido. A disponibilidade de utilização num acumulador mais pequeno é mais rápida, embora o tempo de utilização por parte de um acumulador com maior volume seja superior.

A energia produzida em estradas pobres representa aproximadamente 1% da energia que um veículo consome, quando o combustível utilizado é o gasóleo. Este valor aumenta para 2,5% quando o combustível utilizado é a gasolina.

Quanto aos acumuladores estudados, e relativamente às prestações que cada um obteve, conclui-se que faz mais sentido juntar ao sistema um acumulador de 5 l. Este tem os mesmos desempenhos que o acumulador de 10 l e a vantagem de ser menos pesado para o veículo.

ABSTRACT

This project presents the study, development and design of regenerative damping energy system from vehicle suspensions. It is related to a specific need in reducing fuel consumption, due to increased costs of these and also to help to reduce the dependence on petroleum, adopting more economical and ecological systems.

While it shows that damping of suspensions of vehicles is inherent to its usual movement, the work that the damper does normally is dissipated as heat. The use of regenerative suspension systems comes revamp the functioning of suspensions, allowing them to be energy generating elements. This work addresses the regeneration of energy from one part of a modified damper, using the accumulator as a storage form of energy hydraulic system.

The system built has been tested to evaluate the energy obtained from the accumulated oil in accumulators with 5l and 10l of capacity. The system took into account vehicles powered by diesel or gasoline, running in roads of good, average and poor conditions.

It was found that hydraulic accumulators of different sizes influences the filling time and the volume of added oil. The availability of using a small hydraulic accumulator is faster, although the time of use by a accumulator with a higher volume is greater.

The energy produced on poor roads represents approximately 1 % of the energy that a vehicle consumes, when diesel is used as fuel. This value increases to 2.5 % when the fuel is gasoline. With this project we concluded that it makes more sense to join to the system an accumulator of 5 l. This has the same performance as the accumulator of 10 l capacity and it has the advantage of being less heavy for the vehicle.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO.....	1
Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Motivação	1
1.3 Estrutura da Tese.....	2
2. CAPÍTULO.....	5
Estado da arte	5
2.1 Sistemas de Suspensão.....	5
2.1.1 Suspensão Passiva	5
2.1.2 Suspensão Semi-Ativa	6
2.1.3 Suspensão Ativa.....	7
2.2 Componentes da Suspensão	8
2.2.1 Amortecedor	8
2.2.1.1 Amortecedor Hidráulico Monotubo	9
2.2.1.2 Amortecedor Hidráulico Bitubo.....	10
2.2.1.3 Amortecedor Monotubo a Gás.....	11
2.2.1.4 Amortecedor Bitubo a Gás	12
2.2.1.5 Amortecedores de compensação de carga	13
2.2.1.6 Amortecedor hidropneumático	14
2.2.2 Molas	15
2.2.2.1 Molas de lâminas.....	15
2.2.2.2 Molas helicoidais	16
2.3 Componentes hidráulicos	17
2.3.1 Motor hidráulico.....	17
2.3.2 Acumulador hidráulico	19
3. CAPÍTULO.....	21
Suspensão regenerativa	21

3.1 Suspensões regenerativas mecânicas	21
3.1.1 Suspensão regenerativa hidráulica da LevantPower®	22
3.2 Suspensões regenerativas eletromagnéticas	25
3.2.1 Suspensão regenerativa de motor linear	26
3.2.2 Suspensão regenerativa rotativa	28
4. CAPÍTULO.....	31
Construção do Protótipo	31
4.1 Seleção do Amortecedor.....	31
4.2 Princípio de funcionamento	33
4.2.1 Visão geral do esquema regenerativo.....	33
4.2.2 Circuito de óleo no movimento de subida	34
4.2.3 Circuito de óleo no movimento de descida.....	34
4.3 Desenho do amortecedor	36
4.3.1 Suportes para ligar os amortecedores aos racores	37
4.4 Construção das peças do amortecedor	40
4.4.1 Tecnologias de fabrico.....	40
4.4.2 Fabrico do suporte superior.....	40
4.4.3 Fabrico do suporte inferior	41
4.5 Transformação do pistão do amortecedor em êmbolo	42
4.6 Fixação dos suportes ao amortecedor	43
4.7 Amortecedor regenerativo finalizado	45
4.8 Ensaios práticos	46
5. CAPÍTULO.....	51
Cálculos Teóricos.....	51
5.1 Estrada	51
5.2 Cálculo das forças no amortecedor.....	52
5.3 Cálculo das forças da mola.....	52
5.4 Cálculo do conjunto das forças mola-amortecedor	54
5.5 Cálculo da pressão no amortecedor.....	55
5.6 Quantidade de óleo à saída do amortecedor	56
5.7 Cálculo do Acumulador	57

5.8 Seleção e cálculos do motor óleo-hidráulico	60
5.9 Cálculo da energia.....	61
5.10 Resultados teóricos	62
5.10.1 Resultados para acumulador de 5 litros.....	63
5.10.2 Resultados para acumulador de 10 litros.....	68
6. CAPÍTULO.....	73
Conclusões e Trabalhos Futuros	73
6.1 Conclusões	73
6.2 Trabalhos futuros	74
REFERÊNCIAS	75
ANEXOS	78
ANEXO A – CATÁLOGO GUSTAVO CUDELL (COMPONENTES HIDRÁULICOS)	79
ANEXO B – DESENHOS TÉCNICOS	81
ANEXO C – ANILHAS	84
ANEXO D – RESULTADOS NUMÉRICOS DO ACUMULADOR DE 5 L	86
ANEXO E – RESULTADOS NUMÉRICOS DO ACUMULADOR DE 10 L.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquemas das energias dissipadas e potencial de um veículo [1]	2
Figura 2.1 Suspensão passiva [2]	6
Figura 2.2 Suspensão semi-ativa [4]	7
Figura 2.3 Suspensão ativa [5]	7
Figura 2.4 Comportamento da suspensão de um veículo [6]	8
Figura 2.5 Amortecedor Monotubo [7]	10
Figura 2.6 Amortecedor bitubo [9]	11
Figura 2.7 Amortecedor monotubo a gás [9]	12
Figura 2.8 Amortecedor biubo a gás [10]	13
Figura 2.9 Veículo sem amortecedores de compensação carga e com amortecedores de compesação [7].....	13
Figura 2.10 Instalação de um sistema de compensação de carga [7]	14
Figura 2.11 Amortecedor hidropneumático [7]	14
Figura 2.12 Mola de laminas [12]	16
Figura 2.13 Caraterísticas da mola helicoidal	16
Figura 2.14 Tipos de mola [13].....	17
Figura 2.15 Motor axial [15]	18
Figura 2.16 Acumulador de Bexiga [17]	20
Figura 2.17 Acumulador de diafragma [18].....	20
Figura 3.1 Sistema mecânico VLT para armazenar energia [19]	21
Figura 3.2 Sistema regenerativo LevantPower® [23]	23
Figura 3.3 Comparativo de um amortecedor normal vs Genshock [22]	24
Figura 3.4 Esquema do sistema em equilíbrio [22].....	24
Figura 3.5 Esquema do amortecedor em compressão [22]	25
Figura 3.6 Esquema do amortecedor em produção de energia [22]	25
Figura 3.7 Tipo passivo e ativo [24]	26
Figura 3.8 Modelo de ¼ de carro e controlo através de atuador linear [25].....	27
Figura 3.9 Circuito de carga e circuito no estado passivo [25]	27
Figura 3.10 Suspensão electromagnética [26]	28
Figura 3.11 Esquema do sistema cremalheira / pinhão [27]	29
Figura 3.12 Amortecedor regenerativo com fuso de esferas [28]	29

Figura 4.1 Amortecedor Monoubo [30]	31
Figura 4.2 Desenho do amortecedor monotubo [8]	32
Figura 4.3 Componentes do Pistão [8]	32
Figura 4.4 Circuito regenerativo com pormenor da zona de regeneração; 1,3,11 e 16- Válvulas, 2- Cilindro (Amortecedor), 4,8,10,12,14- Manómetro de pressão, 5 e 19- Bombas hidráulicas, 6 e 18- Reservatórios de óleo,7- Acumulador 9- Motor hidráulico, 13- Válvula reguladora de pressão, 15 e 17- Válvula anti-retorno	33
Figura 4.5 Circuito de óleo durante a subida	34
Figura 4.6 Circuito de óleo durante a descida.....	35
Figura 4.7 Circuito regenerativo com o motor a funcionar.....	35
Figura 4.8 Desenho do amortecedor alterado.....	37
Figura 4.9 Suporte superior	38
Figura 4.10 Posicionamento do suporte superior no tubo do amortecedor	38
Figura 4.11 Suporte inferior	39
Figura 4.12 Posicionamento do suporte inferior no tubo do amortecedor	39
Figura 4.13 Racor -Parte Macho TEMA 2520- ¼”	40
Figura 4.14 Suporte superior fabricado	41
Figura 4.15 Desenho e suporte inferior fabricado	42
Figura 4.16 Constituição do pistão do amortecedor regenerativo	43
Figura 4.17 Anilhas, pistão e porca de aperto	43
Figura 4.18 Pormenor das soldaduras executada para fixar o suportes	44
Figura 4.19 Amortecedor finalizado com o pormenor dos racores e mangueiras	45
Figura 4.20 Bancada de testes óleo-hidráulicos Gustavo Cudell; 1- Botão de acionamento; 2- Manómetros de pressão; 3- Eletroválvula; 4- Acumulador Hidráulico; 5- Válvula manual; 6- Válvula anti-retorno; 7- Válvula reguladora de pressão; 8- Motor hidráulico; 9- Válvula manual.....	47
Figura 4.21 Guia da haste	48
Figura 4.22 Cilindro da banca de ensaios	48
Figura 5.1 Curva do amortecedor à compressão	52
Figura 5.2 Trabalho característico da mola	54
Figura 5.3 Diagrama de pressões e volumes do acumulador	57
Figura 5.4 Gráfico da quantidade de óleo admitida no acululador [16].....	59
Figura 5.5 Características do moror hidraulico [15].....	60

Figura 5.6 Evolução da pressão em uma estrada boa.....	64
Figura 5.7 Volume da bexiga e de óleo no acumulador	64
Figura 5.8 Evolução da pressão em uma estrada média.....	65
Figura 5.9 Volume da bexiga e de óleo no acumulador	65
Figura 5.10 Evolução da pressão em uma estrada pobre	66
Figura 5.11 Volume da bexiga e de óleo no acumulador	66
Figura 5.12 Evolução da pressão em uma estrada boa	68
Figura 5.13 Volume da bexiga e de óleo no acumulador	69
Figura 5.14 Evolução da pressão em uma estrada média.....	69
Figura 5.15 Volume da bexiga e de óleo no acumulador	70
Figura 5.16 Evolução da pressão para uma estrada pobre	70
Figura 5.17 Volume da bexiga e de óleo inserido no acumulador	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Posicionamento recomendado da mangueira [32].....	46
Tabela 2 Diferentes tipos de estrada e n° de ciclos [35]	51
Tabela 3 Forças da Suspensão	55
Tabela 4 Pressões do amortecedor	56
Tabela 5 Velocidade de 4 Pistões e volume de óleo inserido no acumulador	57
Tabela 6 Percentagens de volume de óleo para as pressões de funcionamento do amortecedor	59
Tabela 7 Características dos Combustíveis [36]	61
Tabela 8 Balanço de energia de motores debitando 100 kW ao veio motor [36].....	62
Tabela 9 Velocidade por tipo de estrada	63
Tabela 10 Resultados para o enchimento do acumulador de 5 l	63
Tabela 11 Valores obtidos da descarga do acumulador	67
Tabela 12 Balanço energético	67
Tabela 13 Resultados para o enchimento do acumulador 10 l	68
Tabela 14 Valores obtidos da descarga do acumulador	71
Tabela 15 Balanço energético	72

SIMBOLOGIA

Símbolo	Definição	Unidades S.I
C	Rugosidade da estrada	m
c	Coefficiente de amortecimento viscoso	N.s/m
d	Diâmetro do amortecedor	mm
E	Energia	J
E_{comb}	Energia do combustível	MJ/l
F	Força do amortecedor	N
F_i	Força inicial a que a mola está sujeita	N
F_{mola}	Força aplicada na mola	N
K	Constante de elasticidade	
M	Binário	N.m
N	Frequência Espacial	ciclos/m
N_s	Frequência temporal	ciclos/s
P	Pressão exercida pelo amortecedor	bar
p_0	Pressão inicial	bar
PCI	Poder calorífico inferior	MJ/kg
p_i	Pressão seguinte	bar
V	Volume de óleo	m^3
v	Velocidade do veículo	km/h
V_{H1}	Volume de óleo	m^3
V_{H2}	Volume de óleo	m^3
v_p	Velocidade do pistão	m/s
y	Deformação máxima da mola	mm
y_i	Deformação inicial da mola	mm
η_g	Rendimento global	
η_{hm}	Rendimento hidromecânico	
η_v	Rendimento volumétrico	
ρ	Densidade do combustível	kg/l

1. Capítulo

INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Com este trabalho pretende desenvolver-se um sistema de regeneração de energia através do amortecimento em suspensões de veículos.

Sendo os objetivos principais deste trabalho:

- Estudar, conceber, desenvolver e construir um amortecedor para posterior integração num sistema de regeneração de energia.
- Desenvolver movimentos do sistema regenerativo.
- Selecionar os equipamentos do sistema regenerativo
- Calcular as energias produzidas pelo sistema regenerativo e potencial regenerativo em relação aos combustíveis comumente usados.

1.2 Motivação

A existência de meios de transporte é de especial importância para qualquer sociedade, em qualquer época. Através deles, é possível o deslocamento de pessoas, animais, matérias-primas e mercadorias. A sua evolução fez-se à medida da necessidade de agilizar e superar distâncias. A preocupação das sociedades em possuírem, cada vez mais, melhores transportes resultou em transformações decorrentes de processos de modernização.

No entanto, o crescimento deste sector nem sempre se fez de forma ordenada e ponderada, levantando problemas de natureza ambiental, e outras preocupações como: custos de segurança, a competição pelo espaço urbano e com os riscos associados ao problema da falta de abastecimento de petróleo e dos seus derivados. A problemática dos combustíveis fósseis estimula o debate sobre a sustentabilidade da rede de transportes, da qual a sociedade moderna está dependente.

Deste modo, a utilização de sistemas híbridos tem sido vista como uma das soluções para o problema de falta de autonomia dos veículos exclusivamente elétricos. Estes sistemas utilizam duas formas de energia, normalmente gasolina e energia elétrica para conseguir obter maior autonomia. Contudo verifica-se que só a escolha de um tipo de energia a que o veículo funcionará

não é suficiente para se obterem os níveis de qualidade de uso de hoje em dia e a eficiência energética.

Com a realização deste trabalho pretende contribuir-se para práticas mais sustentáveis no uso de transportes e desta forma, reduzir a dependência destes de fontes não renováveis, poluentes, com flutuações de preços constantes. Aproveitando as perdas de energia num veículo, como na Figura 1.1, nomeadamente o potencial energético das suspensões, que podem recuperar cerca de 10% da energia necessária ao amortecimento, desenvolver-se-á um sistema de regeneração de energia através do amortecimento das suspensões dos veículos. [1]

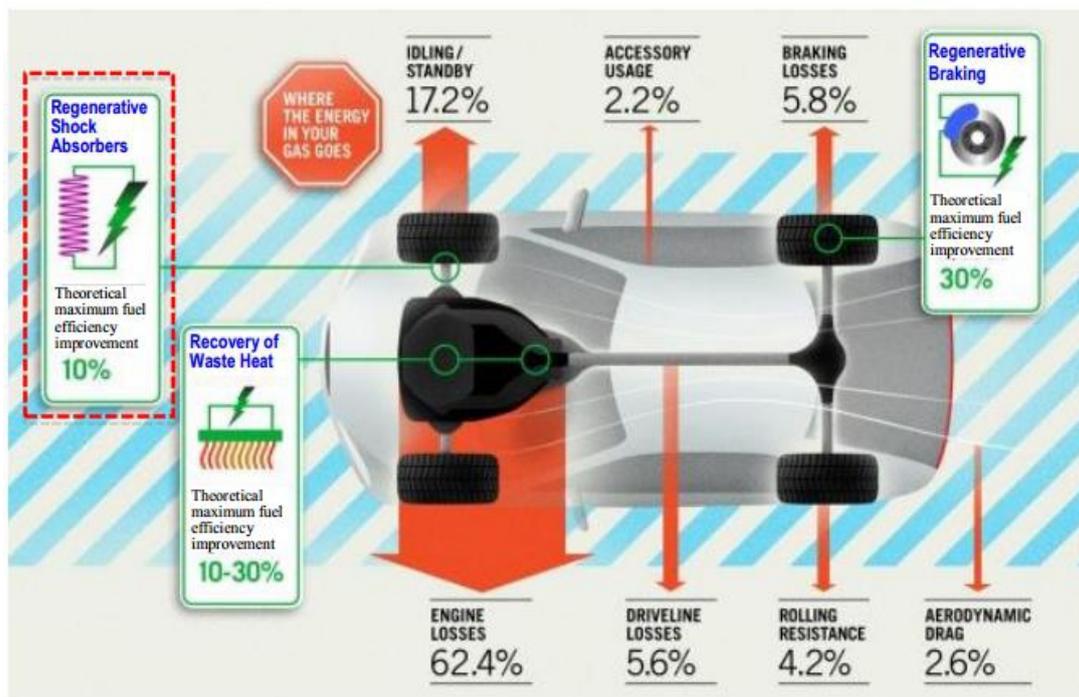


Figura 1.1 Esquemas das energias dissipadas e potencial de um veículo [1]

1.3 Estrutura da Tese

No capítulo 2 são apresentados quais os sistemas de suspensão existentes bem como os componentes que os constituem. São também apresentados os sistemas hidráulicos que fazem parte do projeto.

No capítulo 3 são caracterizados os tipos de suspensões regenerativas existentes, as suspensões regenerativas mecânicas e as suspensões regenerativas eletromagnéticas, assim como um amortecedor GenShock que levou à criação de uma empresa a LevantPower.

No **capítulo 4** está caracterizada a conceção do circuito regenerativo efetuado e a construção do amortecedor. Este capítulo contém também os resultados obtidos nos testes práticos.

No **capítulo 5** apresentam-se os cálculos teóricos do sistema regenerativo.

No **capítulo 6** encontram-se as conclusões finais bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. Capítulo

ESTADO DA ARTE

Ao longo deste capítulo descrever-se-ão os tipos de sistemas de suspensão existentes. Nele far-se-á a caracterização dos sistemas de suspensão, amortecedores e molas. Bem como a caracterização teórica dos principais componentes hidráulicos.

2.1 Sistemas de Suspensão

O sistema de suspensão é composto por uma massa suspensa (carroçaria), massas não suspensas (rodas), molas e amortecedores. A principal função do sistema de suspensão de um veículo é amortecer as vibrações transmitidas pelas irregularidades da estrada e por conseguinte ajudar ao alcance de uma viagem confortável. À medida que as rodas se movimentam sobre a estrada, a irregularidade desta atua como deslocamentos de entrada. As rodas transmitem movimentos de vibração numa determinada gama de frequência. Concomitantemente, as molas e os amortecedores atuam como os filtros de vibração que param a transferência de vibrações à carroçaria do automóvel.

De acordo com o nível de capacidade de controlo, os sistemas de suspensão são classificados como passivos, semi- ativos e ativos.

- O sistema de suspensão passivo é comumente usado em carros comerciais de passageiros devido ao seu valor de mercado. A força de amortecimento é ajustada e fixada em um valor constante.
- O sistema de suspensão semi-ativo utiliza deslocamentos de entrada e oferece um melhor isolamento de vibração, alterando a força de amortecimento de acordo com o perfil da estrada.
- O sistema de suspensão ativo aplica uma força externa a partir do atuador para contrariar a vibração do solo por forma a alcançar uma migração vibratória excelente

2.1.1 Suspensão Passiva

A suspensão passiva, Figura 2.1 engloba todos os sistemas de suspensão tradicionais. A principal característica destes sistemas é que, quando montados no automóvel, os parâmetros

desta suspensão (rigidez, altura) não podem ser controlados externamente. As molas e amortecedores tradicionais são considerados suspensões passivas.

Todas as suspensões correntes são também reativas. Quando a roda de um veículo passa sobre uma elevação ou depressão do piso, a alteração na posição da roda faz com que a suspensão se comprima ou distenda em resposta à solicitação. Operações que impliquem virar, travar e acelerar fazem com que a suspensão se mova, deixando que o *chassis* vire ou desça.

Podemos incluir neste grupo todos os sistemas de suspensão capazes de controlar a altura de condução de acordo com as alterações do peso e da carga aerodinâmica.



Figura 2.1 Suspensão passiva [2]

O sistema é também capaz de reagir a uma carga interna, compensando-a. O sistema possui uma interligação passiva, que facilita a distribuição da carga entre as rodas e dissocia muitos parâmetros e modos de projeto e de operação, tais como a articulação do eixo transversal e a rigidez de uma roda, do controlo de viragem. [3]

2.1.2 Suspensão Semi-Ativa

A suspensão semi-ativa, Figura 2.2, tem como principal característica o facto de ser um sistema que pode alterar continuamente o coeficiente de amortecimento, alterando as condições de rigidez dos amortecedores, dependendo das condições do piso. Este controlo consegue-se associando uma unidade eletrónica de controlo a quatro amortecedores que possuem um coeficiente de amortecimento de variação contínua (e controlável). Por vezes, além das molas helicoidais normais, estes amortecedores podem ser associados a diversas soluções de auto-nivelamento, assim como a sistemas como as suspensões hidropneumáticas, hidro-elásticas e hidro-gás. [3]

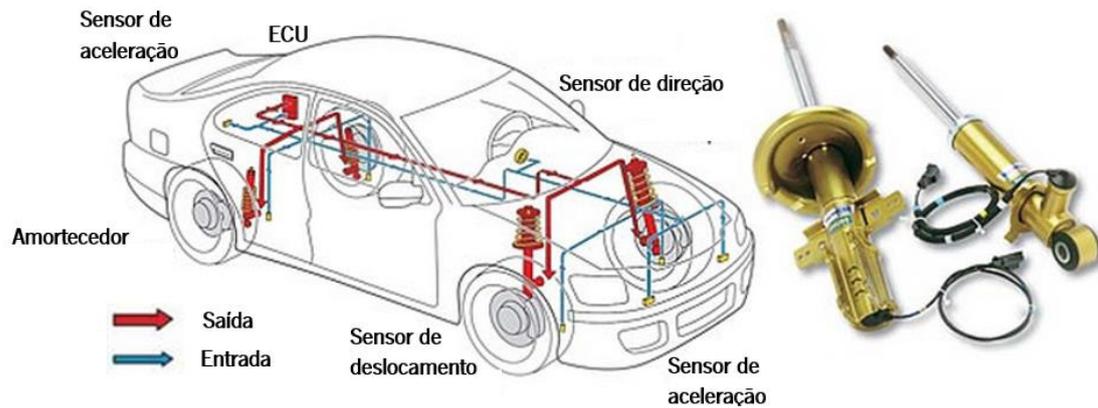


Figura 2.2 Suspensão semi-ativa [4]

As principais vantagens da suspensão semi-ativa são:

- Uma condução ajustável, otimizada em termos de controlo e de manobra;
- A possibilidade de seleccionar a rigidez da suspensão;
- Adaptação automática da suspensão segundo as condições da estrada;
- Dimensão idêntica à dos sistemas de suspensão tradicionais.

2.1.3 Suspensão Ativa

O sistema de suspensão ativa, Figura 2.3, tem a capacidade de se ajustar continuamente às alterações das condições da estrada. Os sistemas de suspensão ativa possuem um sistema de controlo que transmite ao amortecedor de cada roda exatamente quando, como, em que distância e com que velocidade se deve mover. Os movimentos da roda deixam de estar sujeitos às interações aleatórias entre a estrada e as diversas molas, amortecedores, e dispositivos à prova de viragem.

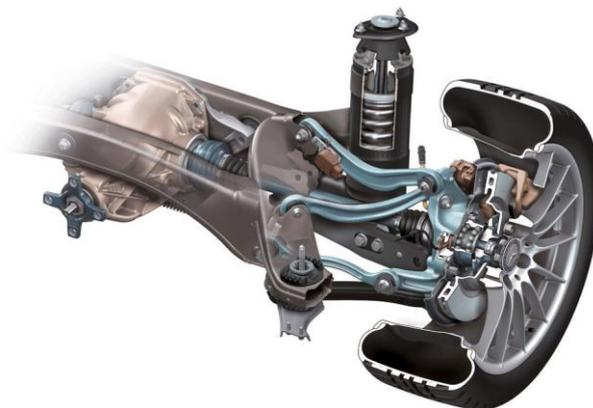


Figura 2.3 Suspensão ativa [5]

O computador que toma estas decisões recorre a uma rede de sensores para medir, por exemplo, a velocidade do veículo, acelerações longitudinais e laterais, e forças e acelerações presentes em cada roda. O computador ordena então à roda que se mova de modo ideal para as circunstâncias existentes. [3]

2.2 Componentes da Suspensão

Dos componentes de suspensão destacam-se dois órgãos fundamentais ao funcionamento de uma suspensão: o amortecedor e a mola, cuja caracterização far-se-á de seguida.

2.2.1 Amortecedor

A principal função dos amortecedores consiste em controlar e amortecer os movimentos de ação e reação das rodas. Quando a roda encontra relevo no pavimento, a mola comprime-se, e distende-se quando atravessa a proeminência, Figura 2.4. Contudo, não volta à posição inicial, mas passa pela posição de equilíbrio estendendo-se em demasia. As oscilações são contínuas até que deixam de existir

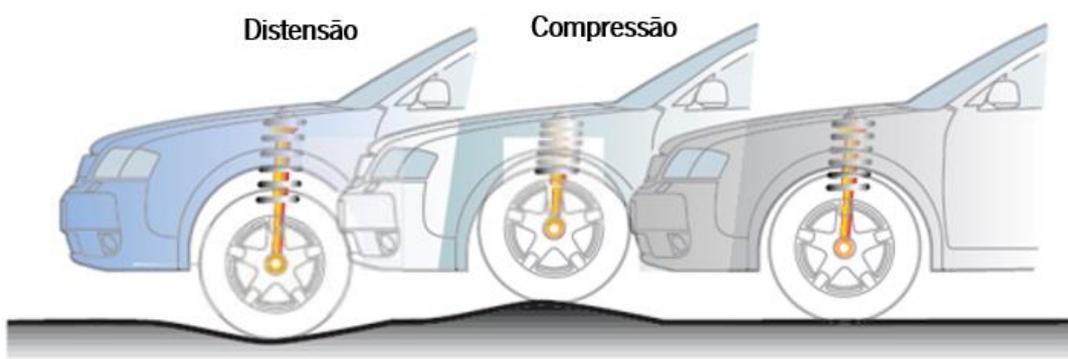


Figura 2.4 Comportamento da suspensão de um veículo [6]

Todavia, quando a mola está nas posições extremas, os pneus não estão em contacto com a estrada. Se esta situação se verificar, a segurança da condução é afetada, representando um perigo com a possibilidade de perda de controlo do veículo. [7]

O amortecedor faz o controlo da ação da mola, não permitindo que a roda se eleve livremente quando encontra um relevo, e executa o amortecimento controladamente sem que a roda suba demasiado, evitando a perda de contacto com a estrada.

Os amortecedores dos veículos têm como principais funções:

- Reduzir as oscilações;
- Controlar o movimento vertical do veículo;

- Assegurar uma boa aderência das rodas ao solo;
- Minimizar o desgaste das rodas e dos componentes do *chassis*;
- Evitar a trepidação da direção.

Anteriormente, os amortecedores mecânicos utilizados trabalhavam por atrito e os amortecedores de alavanca com funcionamento hidráulico. Atualmente, não são empregues, tendo sido substituídos por amortecedores telescópicos.

Existem três tipos de amortecedores telescópicos utilizados:

- Amortecedores hidráulicos;
- Amortecedores a gás;
- Amortecedores de compensação de carga;

Os amortecedores diferenciam-se em amortecedores monotubo e bitubo. A diferença entre estes dois tipos é que, nos amortecedores bitubo, o espaço entre os dois tubos funciona como câmara de compensação.

2.2.1.1 Amortecedor Hidráulico Monotubo

O amortecedor hidráulico monotubo, Figura 2.5, é conforme o nome indica, constituído por um tubo único. Este tubo é fechado numa das extremidades na qual é fixado um olhal que serve de suporte à parte não suspensa da viatura, sendo na outra extremidade fixada a parte suspensa.

O amortecimento das oscilações é feito pela circulação forçada de óleo hidráulico através de uma série de orifícios situados no êmbolo do amortecedor. Essa passagem de óleo pela válvula provoca uma resistência devido ao atrito, desenvolvendo uma certa energia calorífica que é dissipada para a atmosfera com a deslocação do veículo.

Na compressão, dentro do cilindro desloca-se um êmbolo munido de uma válvula bidirecional que comprime o óleo na câmara inferior, obrigando esta a passar para a câmara superior através dos orifícios. Na descompressão verifica-se a situação inversa. O grande inconveniente deste tipo de amortecedor prende-se com o fenómeno de cavitação. [7] [8]

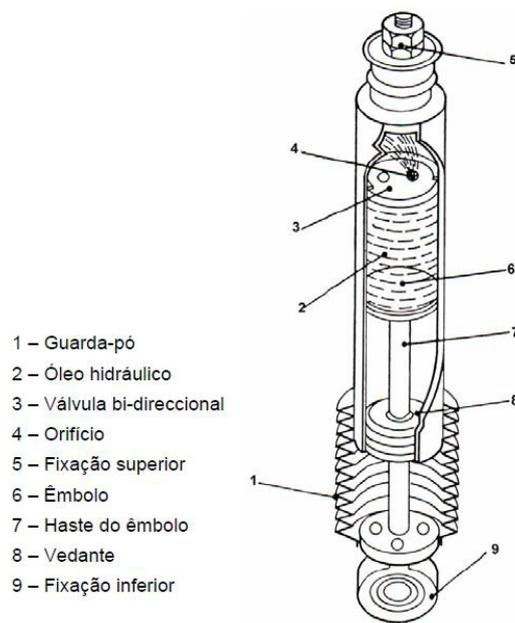


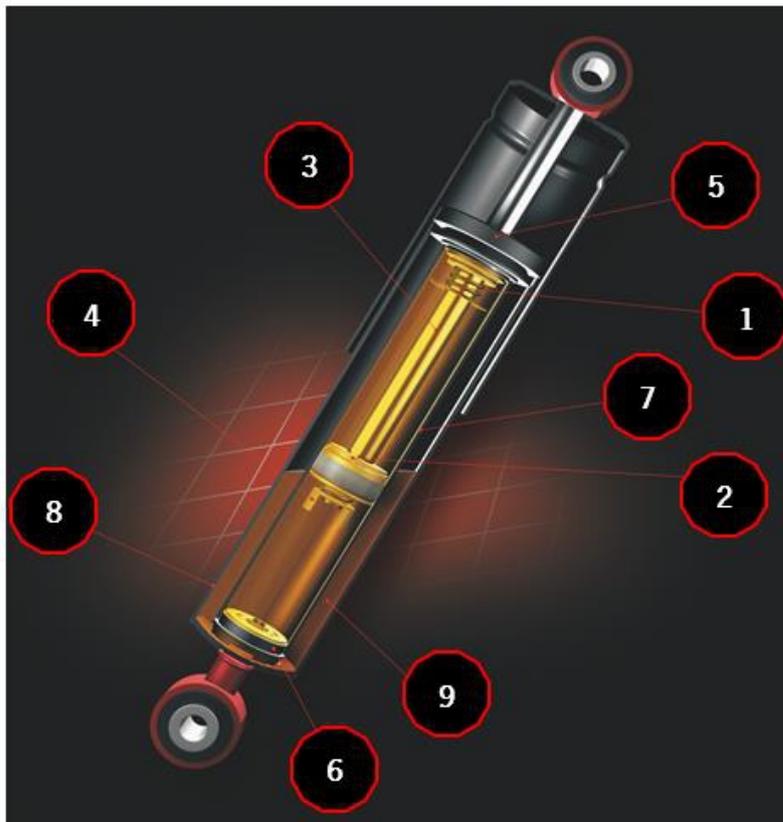
Figura 2.5 Amortecedor Monotubo [7]

2.2.1.2 Amortecedor Hidráulico Bitubo

Os amortecedores hidráulicos bitubo funcionam de forma similar à dos monotubos, mas neste caso o óleo pode ser enviado para a câmara de compensação. Neste tipo de amortecedores, Figura 2.6, as forças de compressão são controladas principalmente por uma válvula de compressão existente na base do amortecedor, através da qual o óleo passa da câmara de compressão para a câmara de compensação (ou equalização). Este movimento é provocado por um êmbolo que desliza no interior do tubo cheio de óleo. O corpo do êmbolo tem orifícios calibrados que permitem a passagem do óleo entre as duas partes do cilindro (superior e inferior).

Quando o êmbolo se movimenta para baixo e para cima, a haste do êmbolo entra e sai do tubo interior, obrigando o óleo a penetrar nas válvulas, dado que há alteração do volume disponível para o óleo. Quando o volume diminui, ou seja na compressão, o óleo é impelido de novo para a câmara de equalização, através da válvula de compressão.

Quando a haste se movimenta para fora, ou seja no ressalto, o volume aumenta, sendo este aumento equivalente ao volume anteriormente ocupado pela haste do êmbolo, criando-se uma depressão que obriga o óleo a passar pelas válvulas do êmbolo e ao mesmo tempo através de um orifício na válvula de compressão. [7] [8]



LEGENDA:

- 1- Vedante de óleo
- 2- Pistão
- 3- Haste
- 4- Unidade de ajustamento
- 5- Guia da haste
- 6- Válvula de base
- 7- Cilindro de trabalho
- 8- Tubo exterior
- 9- Tubo com maior capacidade de óleo

Figura 2.6 Amortecedor bitubo [9]

2.2.1.3 Amortecedor Monotubo a Gás

Os amortecedores a gás, Figura 2.7, operam segundo o mesmo princípio dos amortecedores hidráulicos mas neste caso existe uma câmara cheia de gás (normalmente azoto) a alta pressão (25 bar). Ao contrário do que o seu nome sugere, o amortecedor não contém apenas gás. O fluido de trabalho do amortecedor é o óleo. O gás é apenas utilizado para permitir uma resposta mais rápida do amortecedor às solicitações do pavimento. Existe um êmbolo (pistão flutuante) que separa o gás do óleo, impedindo-os de se misturarem.

Quando a haste do êmbolo passa para dentro do corpo, desloca uma pequena quantidade de óleo, que comprime o azoto. Desta forma o gás sofre alterações de volume. A pressão exercida pelo gás garante uma resposta instantânea, bem como um funcionamento muito silencioso das válvulas do êmbolo.

Um dos principais inconvenientes dos amortecedores hidráulicos é a formação de espuma de óleo e ar, quando o amortecedor funciona a altas velocidades, limitando o rendimento das válvulas. Os amortecedores a gás evitam este problema, pois a pressão exercida pelo gás, evita a cavitação, que provoca a espuma. [7] [8]



LEGENDA:

- 1- Reservatório de gás
- 2- Separador
- 3- Reservatório de óleo
- 4- Pistão flutuante
- 5- Haste
- 6- Guia da haste
- 7- Cilindro de trabalho
- 8- Vedante Teflon®
- 9- Regulador

Figura 2.7 Amortecedor monotubo a gás [9]

2.2.1.4 Amortecedor Bitubo a Gás

O funcionamento do amortecedor bitubo a gás Figura 2.8 é semelhante ao de um amortecedor bitubo hidráulico, no entanto existem duas diferenças. A parte superior do tubo de reserva, o ar à pressão atmosférica é substituída por azoto a uma pressão de 2.5 a 5 bar. O vedante do óleo que rodeia a haste do êmbolo tem uma saliência para evitar a entrada de poeiras, e dois vedantes que impedem a fuga de óleo. A base do vedante tem a forma de uma tira circular flexível que funciona com o vedante de retenção.

A flexibilidade da tira permite ao óleo voltar para o tubo de reserva, mantendo a pressão do gás apenas sobre o óleo que se encontra no reservatório.

O amortecedor bitubo, embora com uma pressão de gás relativamente baixa, (inferior a 5 bar) permite uma melhor passagem do óleo através das válvulas de recuperação, mas como não existe separação efetiva entre o óleo e o gás, quando o amortecedor é muito solicitado a variação brusca de pressão pode provocar a mistura do óleo e do gás, envolvendo-os. Esta situação pode levar a instabilidade no desempenho do amortecedor e à sua degradação mais rápida. [7] [8]

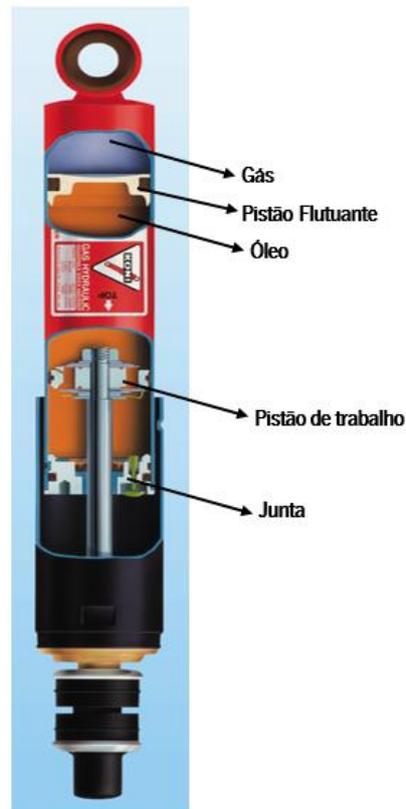


Figura 2.8 Amortecedor biubo a gás [10]

2.2.1.5 Amortecedores de compensação de carga

Os amortecedores de compensação de carga têm como finalidade evitar o “descair” da traseira em condições de carga máxima como se pode verificar na Figura 2.9. Isto é, são semelhantes a amortecedores hidráulicos adicionados de uma mola pneumática que confere rigidez quando é necessário assegurar o nivelamento do veículo

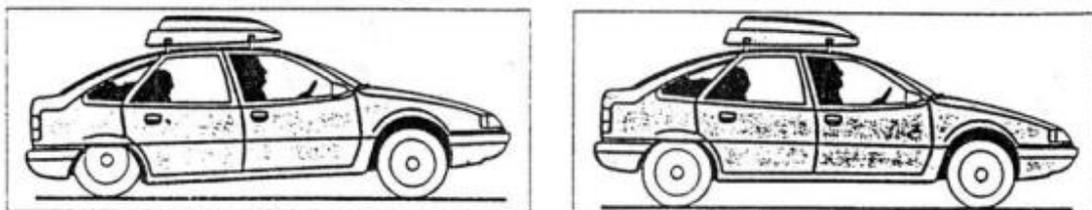


Figura 2.9 Veículo sem amortecedores de compensação carga e com amortecedores de compensação [7]

A mola pneumática tem de ter rigidez para assegurar o nivelamento do veículo quando está carregado. Esta pode ser carregada a partir de dois sistemas. O primeiro pode ser uma rede de ar comprimido, e segundo a partir de um mini compressor montado no veículo como se pode

verificar na Figura 2.10. A suspensão volta ao normal, assim que se reduza a pressão de ar do sistema. [7]

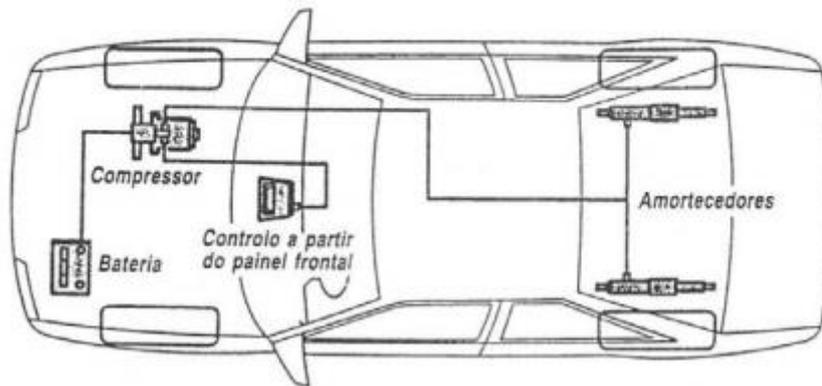


Figura 2.10 Instalação de um sistema de compensação de carga [7]

2.2.1.6 Amortecedor hidropneumático

Os amortecedores hidropneumáticos, Figura 2.11, são também denominados como de esfera. Estes são amortecedores em que o seu sistema de suspensão não necessita de molas. Dentro da esfera (2) existem, separados por uma membrana (13), um gás (A) que ocupa a parte superior da esfera, e um líquido (B) que ocupa a parte inferior. O líquido está ligado ao êmbolo (5) de amortecimento que se encontra inserido no cilindro (1). A utilização destas esferas permite que a distância ao solo seja constante, independentemente da carga a que a suspensão esteja submetida. [7]

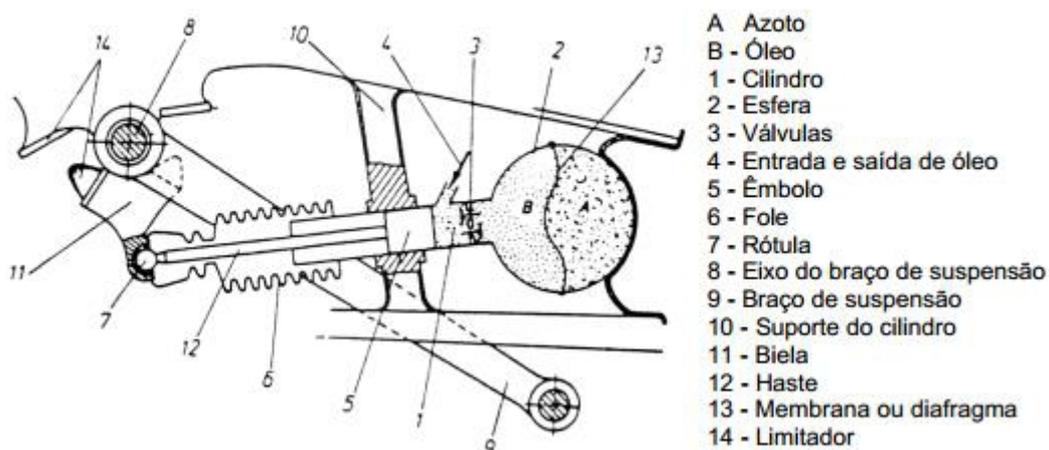


Figura 2.11 Amortecedor hidropneumático [7]

2.2.2 Molas

As molas da suspensão permitem absorver as grandes irregularidades do pavimento, isto é, possibilitam que as rodas se coloquem em planos diferentes, sem que o quadro seja forçado a torcer. Da sua constituição, na maioria dos casos, fazem parte barras de aço temperado e com a elasticidade necessária para o fim em vista. Os três tipos de molas mais utilizados são:

- Molas de Lâminas
- Molas Helicoidais
- Molas (ou Barras) de Torção

Em certos casos também se utilizam molas de borracha e no caso das suspensões pneumáticas e hidro-pneumáticas existem componentes específicos com esta função. [11]

2.2.2.1 Molas de lâminas

Uma mola de lâminas, Figura 2.12 é constituída por uma lâmina principal, na qual se fixam, por meio de um apoio e um parafuso central uma série de lâminas cada vez menores. A lâmina mestra forma, em cada uma das extremidades, um anel (olhal), para permitir a sua ligação ao *chassis* através de um casquilho e de uma cavilha.

A parte central é fixada ao eixo das rodas, ou, se a mola for montada transversalmente em relação à carroçaria, a parte central fica fixa ao *chassis*, e a extremidade ao eixo das rodas. Ao fletir as lâminas produzem-se as oscilações. Durante o funcionamento, verifica-se um certo atrito entre as lâminas, que assegura um amortecimento próprio e que exige uma manutenção cuidada (limpeza e lubrificação).

Para evitar que este atrito conduza ao desgaste das lâminas e produza ruído, verifica-se em certos casos a presença entre as lâminas ativas de lâminas de material sintético anti-atrito. A curva progressiva de amortecimento é obtida por uma sobreposição estudada das lâminas e da espessura apropriada. As molas de lâminas são utilizadas sobretudo em veículos pesados, uma vez que as lâminas podem transmitir diretamente à carroçaria as forças longitudinais de aceleração. [12]



Figura 2.12 Mola de laminas [12]

As molas de lâminas são fixas por braçadeiras. A articulação da mola sobre o veículo é assegurada pela mola mestra, cujos olhais são fixos ao ponto de apoio da mola ou aos brinco, que permitem o alongamento da lâmina aquando das flexões.

2.2.2.2 Molas helicoidais

As molas helicoidais, Figura 2.13, utilizadas sobretudo em veículos ligeiros, são feitas a partir de varão de aço, de secção circular enrolada em hélice. Funcionam por compressão e descompressão das suas espiras, e ao serem torcidas seccionalmente armazenam de modo mais eficaz a energia resultante do movimento ascendente e descendente. [7]

As características mais importantes da mola estão representadas na Figura 2.13

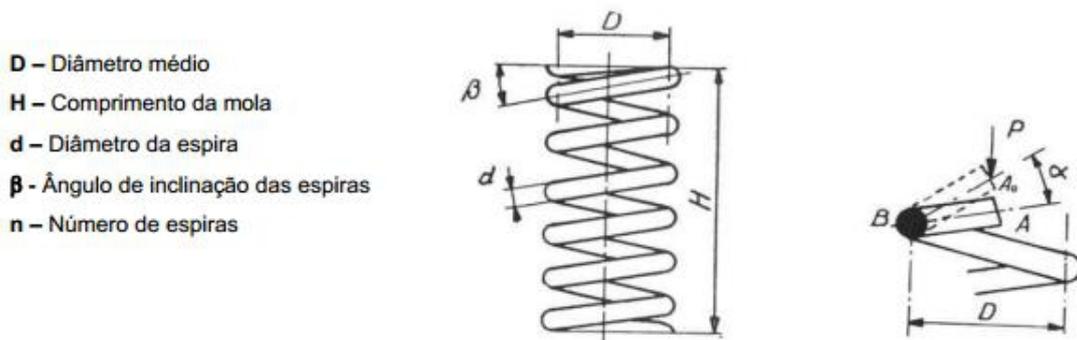


Figura 2.13 Caraterísticas da mola helicoidal

As extremidades das molas são geralmente horizontais para assentarem melhor sobre as superfícies através das quais se transmite o esforço. A sua curva característica é linear e praticamente não possuem amortecimento próprio.

A flexibilidade destas molas, ou seja a sua variação de comprimento em função da carga, depende principalmente do diâmetro do aço, do número de espiras e do comprimento. As molas

em hélice são económicas, pouco volumosas e leves.



Figura 2.14 Tipos de mola [13]

Por vezes, utilizam-se molas de enrolamento cónico ou bicónico Figura 2.14, pois nestes casos as espiras das molas não se tocam, quando a mola é comprimida, podendo encaixar-se na própria espiral reduzindo a altura da mola quando está comprimida, conservando a amplitude de movimento e uma capacidade de carga elevada. A curva característica deste tipo de molas é progressiva. [13]

2.3 Componentes hidráulicos

Dos componentes hidráulicos destacam-se os dois mais importantes neste trabalho, sendo eles o motor hidráulico e o acumulador.

2.3.1 Motor hidráulico

Os motores hidráulicos são máquinas rotativas capazes de converter energia hidrostática em energia mecânica, desempenhando funções simétricas às das bombas. A esta simetria funcional entre bombas e motores corresponde uma analogia construtiva, com exceção de alguns pormenores, fundamentalmente, ao nível do sistema de distribuição, existindo motores de todos os tipos construtivos utilizados nas bombas. Muitos motores podem, ser usados como geradores de energia hidrostática, sendo por isso mais adequado a designação abrangente de “máquinas hidrostáticas”. [14]

As pressões usadas em óleo-hidráulica são sempre elevadas, podendo atingir valores na ordem dos 1000 bar, encontrando-se aplicações em determinados casos de 6000 bar e 14000 bar. As gamas de pressões podem ser, simplificada, organizadas da seguinte maneira:

$P < 50$ bar (5 MPa)	Muito baixa pressão
$50 \leq P < 100$ bar (10 MPa)	Baixa pressão
$100 \leq P < 200$ bar (20 MPa)	Média pressão
$200 \leq P < 400$ bar (40 MPa)	Alta pressão
$P \geq 400$ bar (40 MPa)	Muito alta pressão

O desenvolvimento de pressões desta ordem de grandeza é incompatível com máquinas hidráulicas de tipo dinâmico (turbomáquinas), pelo que, em óleo-hidráulica, utilizam-se, exclusivamente, máquinas do tipo hidrostático (máquinas volumétricas).

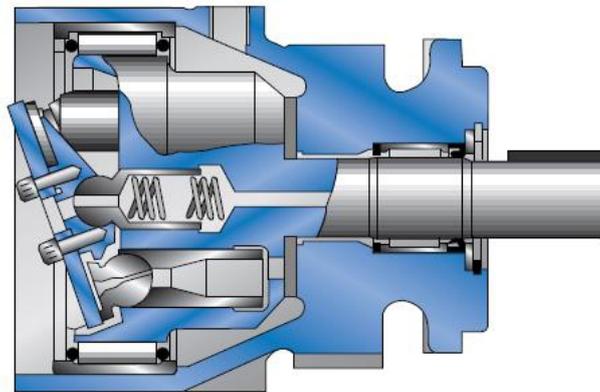


Figura 2.15 Motor axial [15]

Os parâmetros fundamentais para a caracterização de um motor hidráulico são o binário e a velocidade de rotação. A variação da velocidade numa máquina de cilindrada variável pode ser obtida modificando a cilindrada ou o caudal da alimentação. A alteração da cilindrada afeta o binário disponível. O aumento da velocidade conseguido através da redução da cilindrada leva a uma redução do binário, provocando um funcionamento irregular do motor.

Os motores podem ser classificados em dois tipos fundamentais: motores lentos (até ≈ 300 rpm) e motores rápidos (de 30 a 3000 rpm). Relativamente aos aspetos construtivos, os motores hidráulicos podem ser classificados em três grandes grupos: de engrenagens, de palhetas e de êmbolos.

- Motores de engrenagens exteriores (velocidades > 500 rpm, grande binário de atrito estático e baixo binário de arranque. Apropriados para trabalharem a velocidades baixas com binários elevados).
- Motores de palhetas (velocidade de \approx 50 a 3000 rpm. Apropriados para trabalharem a velocidades baixas com binários elevados).
- Motores de êmbolos radiais e axiais (maior versatilidade de utilização lenta: (radiais – estrela fixa ou rotativa) e rápidas (axiais – de barrilete fixo ou rotativo com eixos alinhados ou oblíquos)).
- Motores do tipo orbital ou de êmbolo rotativo

2.3.2 Acumulador hidráulico

O acumulador é um componente hidráulico que consiste num cilindro de aço com tampas torisféricas com um separador entre óleo hidráulico e o gás. O acumulador acumula uma determinada quantidade de óleo e de pressão para posteriormente fornecer ao sistema em que será integrado. O gás colocado no acumulador nunca poderá ser oxigénio nem ar, terá de ser azoto, e este é responsável por transferir a pressão o caudal acumulado ao circuito quando este assim o requeira. [16]

Os acumuladores permitem:

- Restituir e compensar pequenas perdas de óleo de um circuito.
- Evitar a dilatação derivada das mudanças de temperatura, fazendo perder pressão
- Acumular energia funcionando como um elemento de reserva.
- Funcionar como elemento amortecedor de pulsos de uma bomba
- Elemento de segurança, evitandas interrupções súbitas do gerador de potência hidráulica.

Existem vários tipos de acumuladores como por exemplo os de bexiga e os de diafragma.

O acumulador de bexiga, Figura 2.16, sendo esta habitualmente em *Ferbunan* e dispendo de uma válvula de enchimento e retenção fixada por vulcanização

Os acumuladores de diafragma Figura 2.17 são constituídos por dois corpos de aço que tem entre eles uma membrana de borracha. Tanto a válvula de enchimento como a válvula de entrada de óleo são montadas diretamente no corpo do acumulador.



Figura 2.16 Acumulador de Bexiga [17]



Figura 2.17 Acumulador de diafragma [18]

Estes dois tipos de acumuladores trabalham sem atrito e não têm inércia, podendo em pouco tempo absorver e fornecer volumes de óleo apreciáveis. Como meio de segurança, ambos têm uma válvula ou equipamento semelhante que fecha o orifício de entrada e saída de óleo quando a parede elástica dilata até ao máximo, prevenindo desta forma que haja extrusão da parede.

Um inconveniente destes equipamentos é a necessidade de ser carregados, periodicamente, com uma garrafa de gás sob pressão. A carga terá de ser periódica por forma a compensar eventuais fugas.

3. Capítulo

SUSPENSÃO REGENERATIVA

No que se refere a suspensões regenerativas existem dois tipos de equipamentos as suspensões regenerativas mecânicas e as suspensões regenerativas eletromagnéticas. As suspensões do tipo mecânico convertem a energia de vibração em energia hidráulica ou pneumática, por via mecânica, posteriormente essa energia poderá ser armazenada por acumuladores.

O tipo de suspensões regenerativas eletromagnéticas converte a energia da vibração em energia elétrica que será armazenada em baterias para posteriormente ser utilizada nos sistemas elétricos do carro.

3.1 Suspensões regenerativas mecânicas

Fodor e Redfield propõem um mecanismo de transmissão linear variável (VLT) para recuperar a energia da vibração por transmissão mecânica. É proposto descobrir qual o potencial de barreira de um dispositivo de armazenamento. A potência armazenada é o produto entre força e a velocidade de entrada. O pistão força o fluido a passar para um acumulador hidropneumático onde o amortecedor regenerativo exerce pressão e converte a força de entrada em força de amortecimento desejada. [19]

O sistema VLT foi analisado tendo como base o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro representado na Figura 3.1. Neste modelo está presente uma alavanca, que serve para destacar de certa forma a barreira de acumulação de energia.

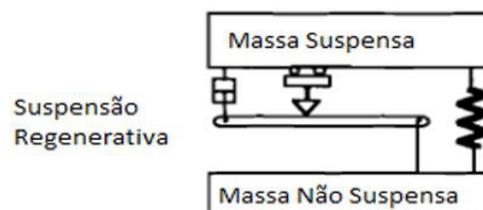


Figura 3.1 Sistema mecânico VLT para armazenar energia [19]

Para se proceder ao armazenamento a força necessária de entrada é uma função do ponto de apoio, podendo este variar de zero até ao infinito, independentemente da posição e direção da força. O ponto central que é móvel, faz com que as variáveis do sistema mudem, ajustando a força de amortecimento desejada. Este ponto age como se fosse um amortecedor viscoso e passivo,

sendo que a força é diretamente proporcional à posição do ponto de apoio mantendo-se o coeficiente de amortecimento constante. No entanto, o caso ideal do sistema não é ajustado à realidade, tendo-se de considerar o caso onde o ponto fulcral não é o ideal. As forças atuantes no sistema funcionam como limites mínimos para o controle de entrada adicionando um atraso de fase. A atuação lenta proporciona um ponto de apoio onde a posição média faz o amortecedor se comportar como um amortecedor de atrito de Coulomb.

Este amortecedor regenerativo pode contudo produzir uma força constante para alcançar o desempenho desejado. Contudo algumas limitações mostram para a condição de ser ideal. Além disso, a principal preocupação do sistema é a sua viabilidade.

Os resultados mostram que para se controlar totalmente a vibração induzida pela rugosidade da estrada, o sistema mecânico terá de ter um grau de liberdade. Sendo que, um resultado significativo deste sistema mostra que a energia produzida realmente é muito menor do que a necessária para o sistema de controlo.

James A. Stansbury patenteou uma suspensão regenerativa com um sistema de acumulação de energia. Neste sistema uma bomba é ligada a um acumulador cilíndrico por intermédio de manguerias, alojando-se ao longo das longarinas por de baixo do veículo. Neste sistema um fluido pressurizado, como ar ou outro, carrega o acumulador. O fluido sobre pressão, é libertado por intermédio de uma válvula que que controla o fluxo, a fim de se produzir trabalho.

O autor diz que se poderá instalar uma bomba hidráulica, que por intermédio de um dispositivo, transforma o trabalho em eletricidade. Esta energia poderia então ser utilizada para alimentar baterias, que fornecem energia ao circuito elétrico do veículo. No entanto, a baixa frequência e resposta lenta apresentam-se como principais desvantagens. Juntando o facto do sistema VLT não corresponder à realidade das solicitações pois não consegue controlar as vibrações, como seria desejável. [20]

3.1.1 Suspensão regenerativa hidráulica da LevantPower®

O sistema desenvolvido por estudantes do MIT Zack Anderson e Shakeel Avadhany deu origem a um amortecedor regenerativo denominado por GenShock que levou à fundação da empresa LevantPower. O mercado de trabalho da LevantPower insere-se nos transportes, rodoviários e ferroviários, de passageiros e mercadorias, veículos militares e veículos híbridos.

O amortecedor regenerativo GenShock é fabricada em aço. O funcionamento destes é feito através da força que é exercida no amortecedor, fazendo com que os amortecedores se comprimam e expandam. O movimento executado faz com que o fluido hidráulico (óleo) atravesse um motor hidráulico que está ligado a um gerador produzindo eletricidade, sendo esta armazenada em baterias. Este sistema consegue produzir uma energia na ordem dos 2 MJ para um deslocamento de 9 cm. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, verifica-se o sistema a LevantPower assim como GenShock. [21] [22]



Figura 3.2 Sistema regenerativo LevantPower® [23]

Este sistema de suspensão LevantPower® é controlado eletronicamente, por um sistema de suspensão ativo, no caso de falha, o amortecedor funcionará com sistema de regeneração desativado, funcionando como um amortecedor convencional, não colocando em risco os outros componentes do sistema de regeneração de energia.

Como se verifica na, Figura 3.3, temos uma comparação esquemática entre um amortecedor hidráulico bitubo (tubo duplo) e o GenShock. Nos amortecedores convencionais são utilizadas válvulas que restringem a passagem do óleo favorecendo apenas a ação de amortecimento e, conseqüentemente, a dissipação de energia. No sistema GenShock o desenho foi desenvolvido especificamente para produzir energia.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, o amortecedor GenShock tem um istão como os demais amortecedores, no entanto este faz o movimento alternativo dentro do cilindro. No reservatório é depositado o óleo que movimenta todo o sistema. O óleo está contido no cilindro do amortecedor e encontra-se em contato direto com o óleo do reservatório e o motor hidráulico. [22]

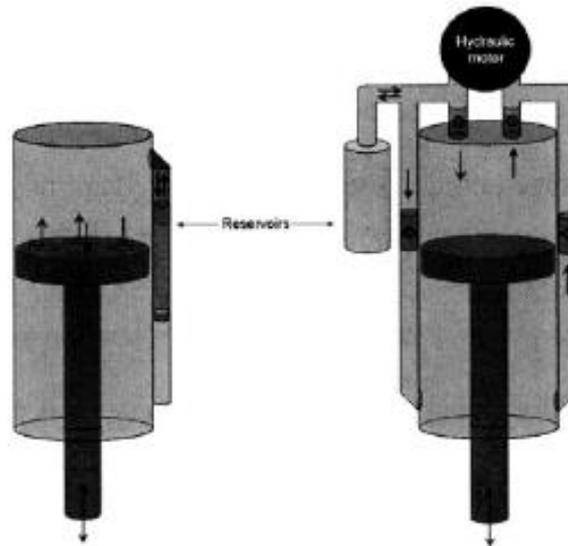


Figura 3.3 Comparativo de um amortecedor normal vs Genshock [22]

Na Figura 3.4 pode visualizar-se o sistema desenvolvido na posição de equilíbrio. Quando é feita a compressão do sistema, o óleo é forçado dentro do cilindro, atravessando a válvula 4. A válvula 3 previne a entrada do óleo pela base do cilindro. Após passar pela válvula 4 o óleo é direcionado para o motor hidráulico 6 e para o reservatório 7

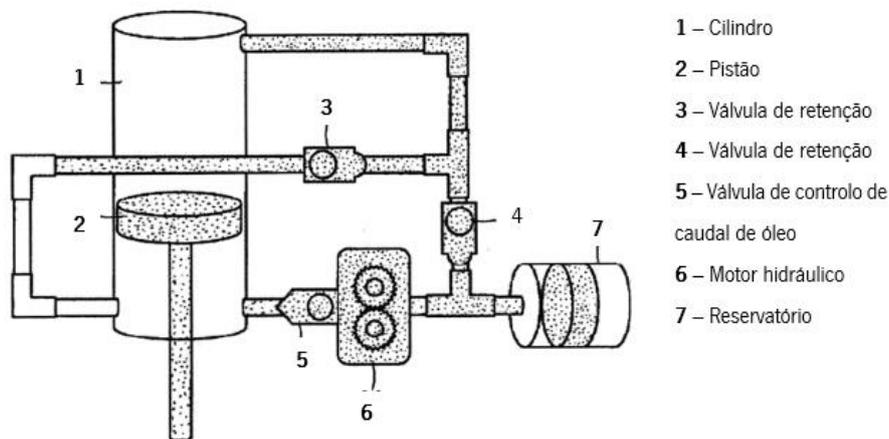


Figura 3.4 Esquema do sistema em equilíbrio [22]

O reservatório serve para armazenar picos de pressão e suavizar a pressão de óleo à medida que o motor vai sendo alimentado. Erro! A origem da referência não foi encontrada..

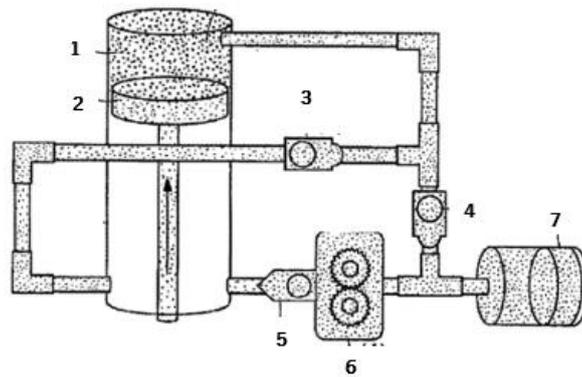


Figura 3.5 Esquema do amortecedor em compressão [22]

Relativamente à **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, à medida que o óleo travessa o motor faz rodar o eixo-motriz. O eixo-motriz é acoplado a gerador elétrico, como por exemplo, um alternador. Assim sendo, a energia produzida pelo alternador pode ser armazenada em baterias elétricas.

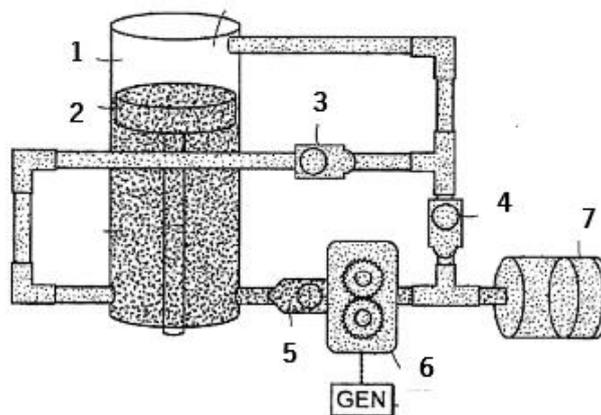


Figura 3.6 Esquema do amortecedor em produção de energia [22]

3.2 Suspensões regenerativas eletromagnéticas

Com o passar dos anos os mecanismos magnéticos foram implementados para fornecer a força aos sistemas semi-ativos. A força de amortecimento pode ser facilmente alterada por intermédio de resistências.

Este tipo de amortecedores converte as vibrações em eletricidade recorrendo a motores lineares ou motores rotativos, realizando assim o autocontrolo. Podendo ainda, a suspensão eletromagnética ser modelada para se comportar como passiva, semi-ativa, ou uma suspensão ativa.

3.2.1 Suspensão regenerativa de motor linear

A suspensão regenerativa de motor linear foi objeto de estudo de Okada, Harada e Suzuki. Estes cientistas estudaram o controle ativo e controle da vibração regenerativa, usando um atuador linear. Esse atuador age como uma suspensão e gerador como se pode verificar na Figura 3.7. Neste sistema quando o amortecedor oscila a grande velocidade, o amortecedor está num estado regenerativo. Contudo, quando a velocidade é baixa, a energia gerada não é suficiente para superar o potencial de energia. O sistema é então desviado por uma resistência, tornando o amortecedor passivo. [24]

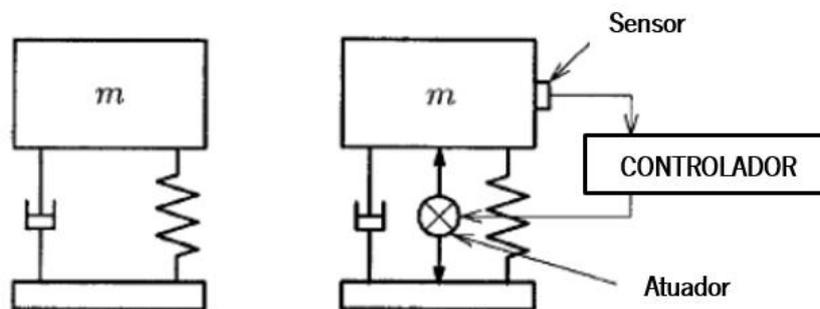


Figura 3.7 Tipo passivo e ativo [24]

Em 2003, Nakano, Suda e Nakadai investigaram sobre a auto-alimentação de um amortecedor regenerativo, usando motores lineares. A potência necessária para o funcionamento foi estimada através da avaliação do deslocamento e da velocidade, passando-se então à modelação do motor linear bem como os sensores. Com isto, estuda-se a potência regenerativa através da dinâmica do choque. A elaboração de uma análise de balanço energético é essencial para avaliar e estudar a viabilidade de se alcançar o controle ativo. A figura mostra dois graus de liberdade do protótipo de $\frac{1}{4}$ de veículo integrando um atuador linear e sensores que verificam o controle ativo auto alimentado. [25]

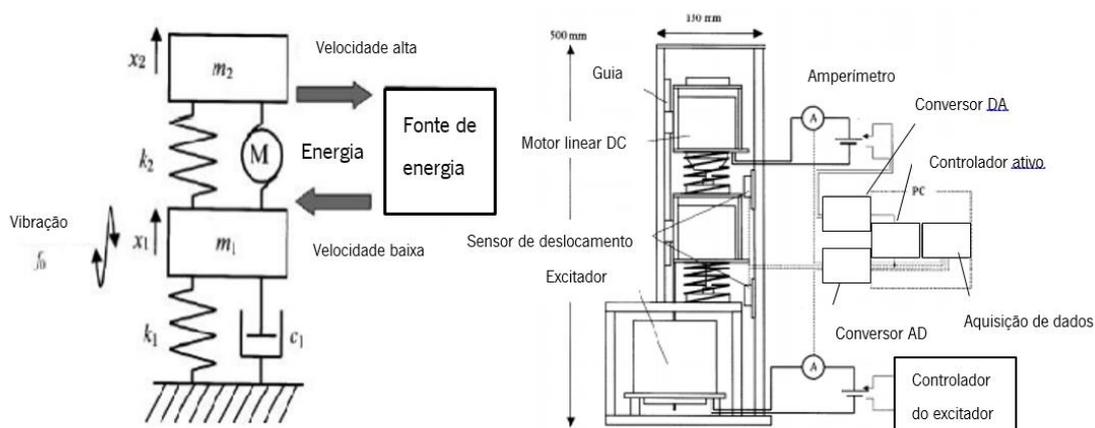


Figura 3.8 Modelo de 1/4 de carro e controlo através de atuador linear [25]

Neste sistema, a excitação do piso é modelada através da entrada de ruído, e acionada por meio de um agitador. O circuito de regeneração da Figura 3.9 foi dimensionada para recuperar energia quando a velocidade de amortecimento é elevada, ou a suspensão ativa o circuito com resistência. A corrente alternada é convertida em corrente contínua, para assim poder carregar a bateria. Sendo que a bateria é usada para fornecer uma força alternada para contrariar a vibração induzida pelo piso.

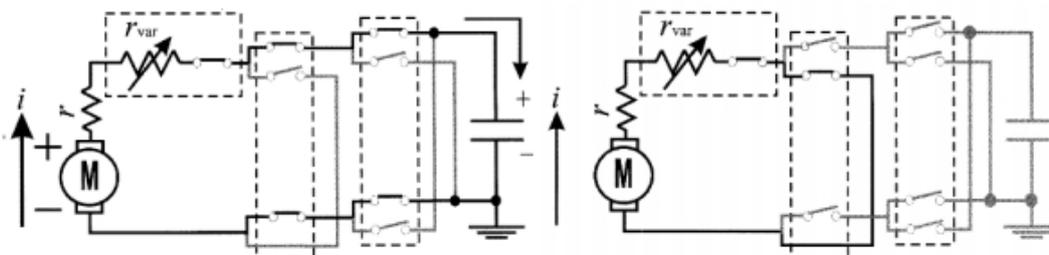


Figura 3.9 Circuito de carga e circuito no estado passivo [25]

Neste sistema a utilização de sensores é importante para se fazer o controlo consoante o feedback. Este sistema é capaz de fazer o controlo semi-ativo, no entanto o atuador em determinadas condições é incapaz de gerar a força suficiente.

Em 2009, Zuo contruiu um sistema linear de recuperação energética para testar a quantidade de energia que poderia ser recolhida. Metade do dispositivo contruído por Zuo é constituído por ímanes individuais fixos e bobines, como demonstra a Figura 3.10.

Neste amortecedor, os dispositivos magnéticos estão separados por espaçadores em aço. A eletricidade é gerada quando a bobina corta o fluxo magnético. Zou afirmou que o revestimento em aço orienta o fluxo, fazendo aumentar significativamente a potência. Este protótipo foi testado numa máquina de testes para amortecedores, sendo que os resultados obtidos eram semelhantes aos esperados teoricamente. Afirmou também, que este sistema poderá gerar 16 W a uma velocidade média de 0,25 m/s do pistão. [26]

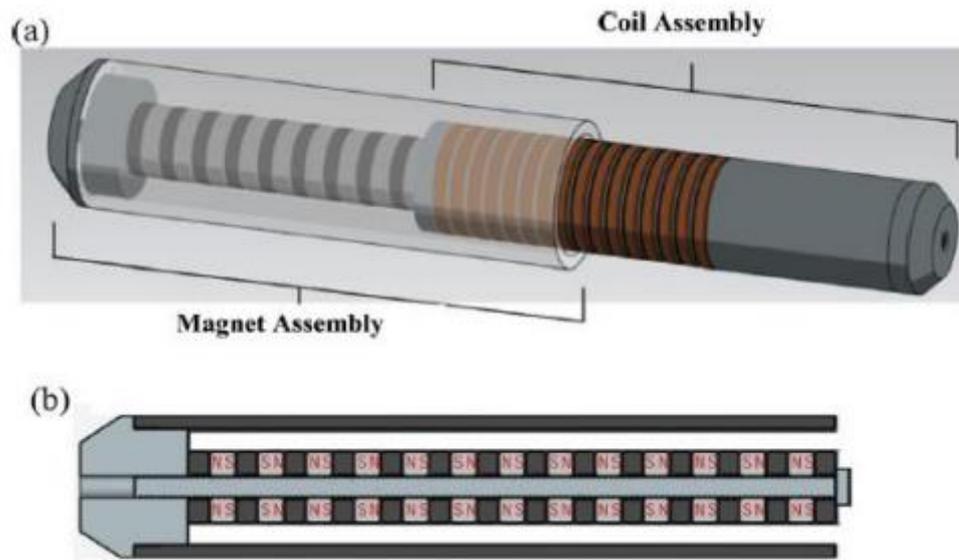


Figura 3.10 Suspensão electromagnética [26]

Estes amortecedores poderão ainda ter as mesmas dimensões dos amortecedores já existentes. As perdas por atrito são relativamente pequenas, visto não haver contato entre a bobine e os ímãs. Neste tipo de amortecedores a energia regenerada não é grande. O autor salientou que os sistemas de suspensão onde se encaixam melhor este tipo de tecnologia são os sistemas, passivo e semi-ativo.

3.2.2 Suspensão regenerativa rotativa

Em 1996, Suda and Shiiba [27] propuseram um sistema que consiste numa suspensão regenerativa onde um motor rotativo de corrente contínua funciona como atuador. Neste sistema o movimento linear do amortecedor é convertido num movimento rotativo por intermédio de um mecanismo de cremalheira e pinhão.

O motor de corrente contínua é associado a uma caixa de velocidades que irá ampliar a geração de energia, que é suficiente para o sistema de controlo ativo. Estes protótipos não foram projetados da mesma forma que os amortecedores convencionais verificar Figura 3.11.

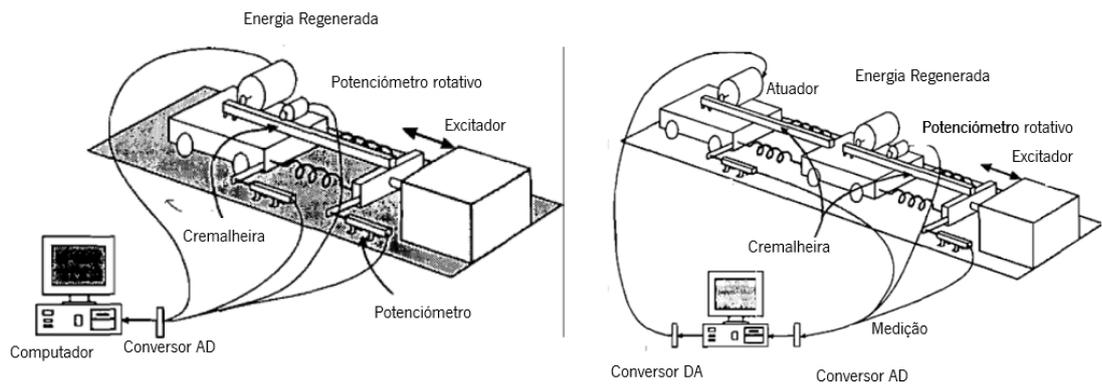


Figura 3.11 Esquema do sistema cremalheira / pinhão [27]

Em 2004, Nakano e Suda, simularam um sistema regenerativo auto alimentado, utilizando um mecanismo conhecido como fuso de esferas. O amortecedor com fuso de esferas apresentado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, foi concebido para controlar o sistema de suspensão ativo de um caminhão. [28]

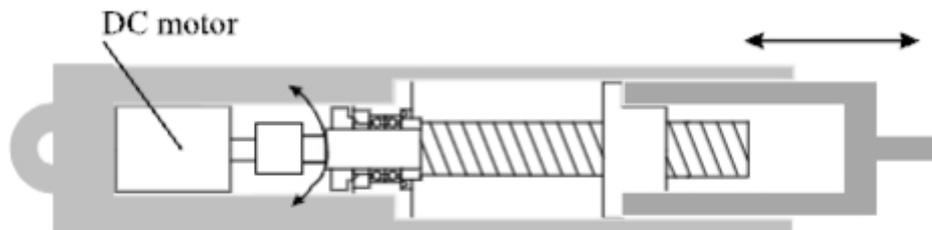


Figura 3.12 Amortecedor regenerativo com fuso de esferas [28]

Neste amortecedor, à medida que o motor gira, o fuso de esferas também gira fazendo com que a porca efetue forças de tração e compressão. Segundo o resultado teórico este valida o auto controle ativo, utilizando o mecanismo de fuso de esfera exceto quando as forças atuantes não coincidem com as forças de determinados estados. Com este sistema, o motor é capaz de desenvolver o binário suficiente para o controle ativo. Este sistema tem como desvantagens o seu tamanho o peso e fato e as perdas inerentes à transmissão.

4. Capítulo

CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Nesta fase do trabalho idealizou-se qual seria a melhor forma de alterar um amortecedor convencional já existente, por forma a conseguir integrá-lo num sistema de regeneração de energia. Foi concebido um sistema hidráulico, para se conseguir facilmente armazenar e realizar energia. Os testes e verificações do sistema hidráulico foram realizados no Laboratório de Automação.

4.1 Seleção do Amortecedor

O amortecedor adaptado foi fabricado pela empresa KYB, que produz componentes automóveis, para a Renault entre outras construtoras.

O amortecedor selecionado para a realização deste trabalho foi um amortecedor hidráulico monotubo. A sua escolha prende-se com o facto de existir um estudo realizado na Universidade do Minho sobre amortecedores cujos resultados podiam ser aproveitados para o amortecedor em estudo. [29] Na Figura 4.1 encontra-se o modelo utilizado para modificação.



Figura 4.1 Amortecedor Monotubo [30]

Na Figura 4.2 apresenta-se o desenho do amortecedor monotubo utilizado para a construção do amortecedor.

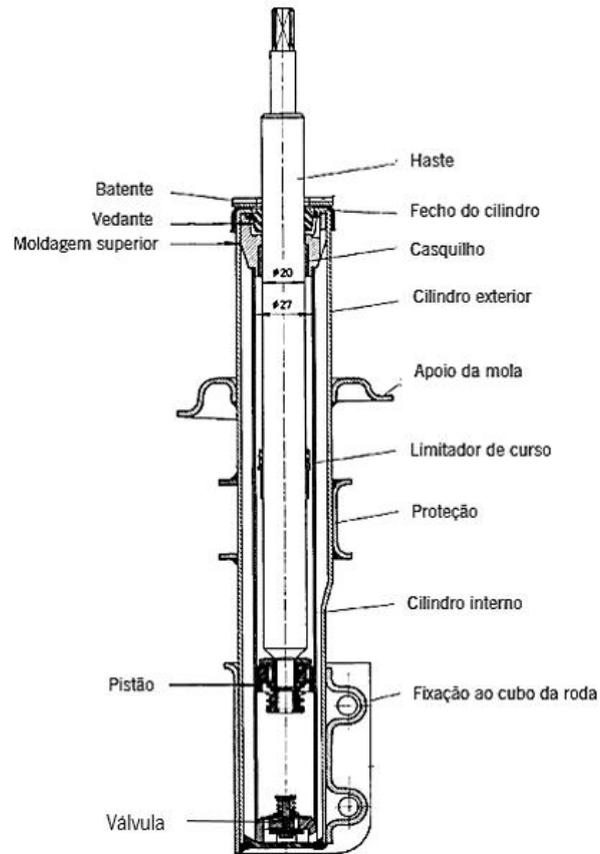


Figura 4.2 Desenho do amortecedor monotubo [8]

Na Figura 4.3 pode visualizar-se em pormenor os vários constituintes do pistão do amortecedor. São estes componentes que fazem a regulação do óleo que atravessa a parte superior do cilindro e inferior.

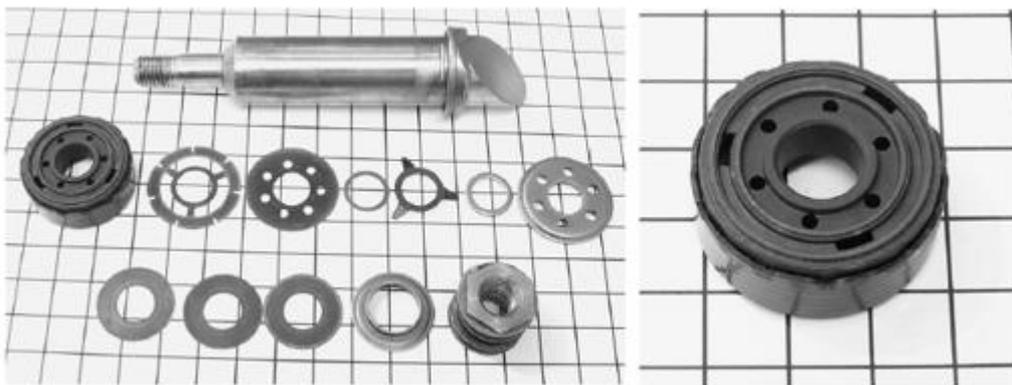


Figura 4.3 Componentes do Pistão [8]

4.2 Princípio de funcionamento

Uma vez que o sistema regenerativo é hidráulico, utilizou-se o *software Automation Studio®* como meio de obtenção de um esquema representativo dos movimentos a serem efetuados pelo óleo no amortecedor e no circuito do sistema regenerativo. A realização destes esquemas facilitou o processo de montagem e a elaboração deste trabalho, que foi posteriormente executado no Laboratório de Mecatrônica.

4.2.1 Visão geral do esquema regenerativo

No esquema apresentado na Figura 4.4 é mostrada toda a arquitetura do sistema de regeneração de energia para veículos. Sendo que a zona delimitada pela caixa a vermelho identifica o sistema regenerativo bem como os componentes que o constituem.

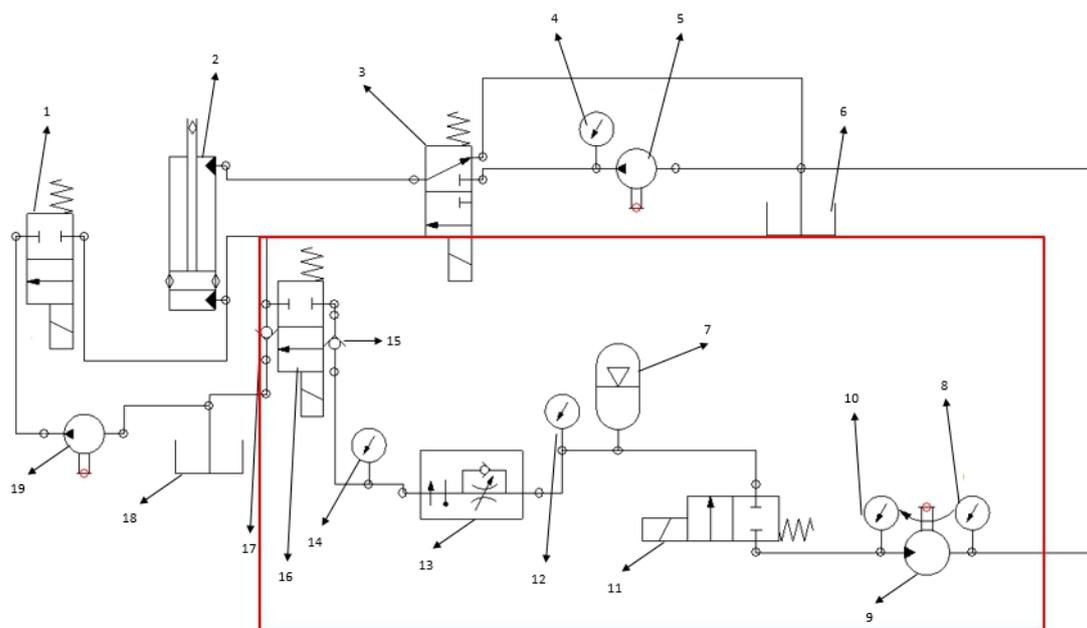


Figura 4.4 Circuito regenerativo com promenor da zona de regeneração; 1,3,11 e 16- Válvulas, 2- Cilindro (Amortecedor), 4,8,10,12,14- Manómetro de pressão, 5 e 19- Bombas hidráulicas, 6 e 18- Reservatórios de óleo,7- Acumulador 9- Motor hidráulico, 13- Válvula reguladora de pressão, 15 e 17- Válvula anti-retorno

O circuito da figura 4.4 serve para visualizar a disposição que os componentes hidráulicos irão assumir no circuito regenerativo. Este esquema apresenta algumas limitações, nomeadamente a indicação da presença de bombas, que dificilmente seriam integradas num sistema real. No entanto, a sua presença no esquema serve para desempenhar a função das molas da suspensão, assim como as válvulas 1 e 3. O cilindro escolhido para integrar este sistema representa o amortecedor.

4.2.2 Circuito de óleo no movimento de subida

Na figura 4.4 é apresentado o funcionamento da suspensão quando a mola empurra o amortecedor para cima. Assim, quando o cilindro está na fase ascendente e a válvula 2/2 posterior está aberta, a bomba (19) obriga a que o óleo entre no cilindro fazendo-o subir, simulando o efeito da mola. Numa situação real, o pistão faria a aspiração de óleo para o interior do cilindro e a força de subida era efetuada pela mola. No entanto, a válvula 3/2 (3) que está ligada ao orifício superior do cilindro fica na posição aberta, deixando passar o óleo contido na parte superior do cilindro, para o reservatório (6). Neste momento, o sistema de regeneração ainda não se encontra a funcionar.

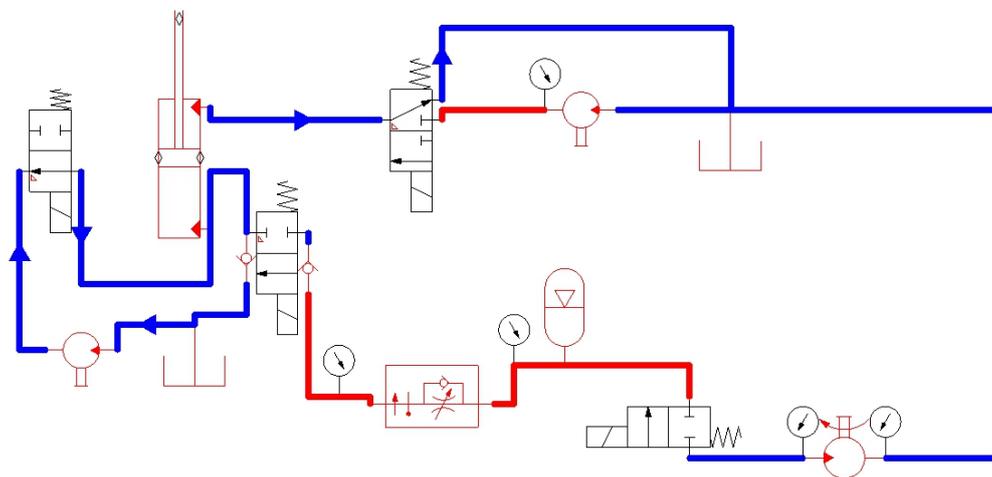


Figura 4.5 Circuito de óleo durante a subida

4.2.3 Circuito de óleo no movimento de descida

O próximo circuito refere-se ao movimento de descida do pistão, que se divide em duas etapas. A primeira referente à acumulação de óleo e a segunda ao trabalho do motor hidráulico.

Na fase de descida apresentada na Figura 4.6, a válvula 2/2 (1) fica aberta para que seja possível passar o óleo. A quantidade de óleo que atravessa a válvula, tem que obedecer à pressão estipulada pela válvula reguladora de pressão (13) posicionada imediatamente a seguir. A válvula é ajustada pelo coeficiente de amortecimento. Após ocorrer a abertura da válvula, o acumulador começa a encher aumentando a pressão até um determinado valor. Nesta ligação existe ainda uma válvula anti-retorno, para que o óleo que sai do amortecedor, não torne a entrar pelo efeito de sucção.

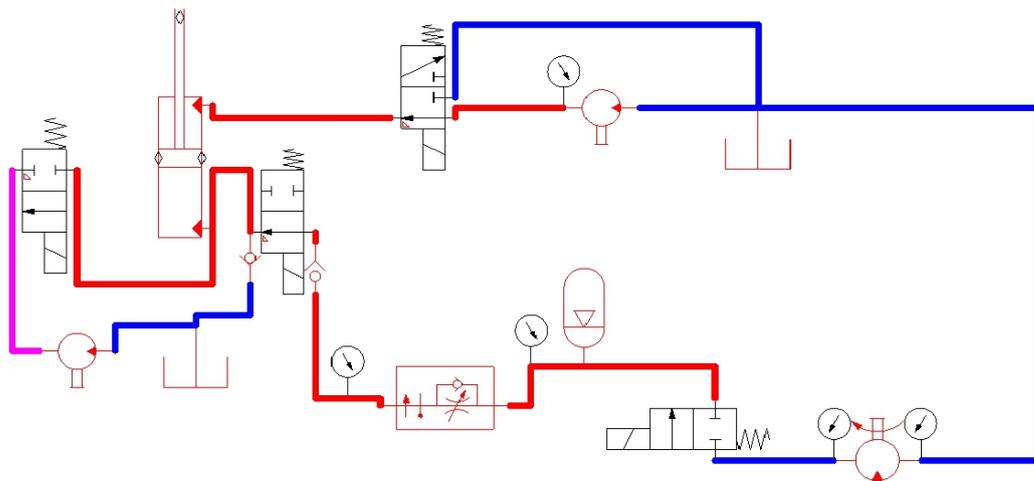


Figura 4.6 Circuito de óleo durante a descida

Na segunda fase, e quando ainda se está no movimento de descida, o acumulador descarrega a pressão abrindo a válvula 2/2 (11) existente entre este e o motor. Processa-se então a fase de produção de energia.

Na Figura 4.7 pode verificar-se o começo de descarga do acumulador, colocando o motor (9) a trabalhar.

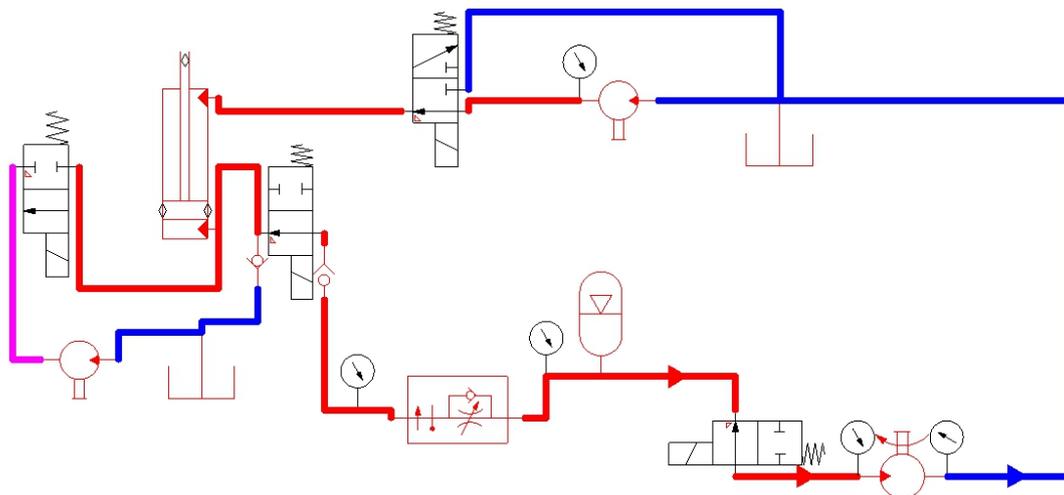


Figura 4.7 Circuito regenerativo com o motor a funcionar

4.3 Desenho do amortecedor

O protótipo idealizado do amortecedor regenerativo necessitou que se incorporassem novos elementos desenvolvidos especificamente para poderem integrar facilmente o amortecedor monotubo no circuito regenerativo idealizado. Da mesma forma, foram eliminados alguns componentes que faziam parte do amortecedor convencional já existente, que serviu de base para o projeto.

O amortecedor monotubo é constituído por vários componentes desenvolvidos para realizarem as funções destinadas ao amortecimento, como o pistão que contém orifícios calibrados e deixam atravessar o óleo. Em seguida enumerar-se-ão os componentes que foram eliminados do amortecedor-base, tais como:

- Estrutura de fixação ao cubo da roda
- Cilindro externo
- Apoio da mola
- Válvula multifásica da base

A Figura 4.8 mostra a solução desenvolvida para a transformação do amortecedor convencional num amortecedor que pode integrar o circuito regenerativo. Do amortecedor desenvolvido destacam-se os suportes para os racores. Estes integram o novo amortecedor, pois o existente não tem qualquer ligação com o exterior. Os suportes foram desenvolvidos de modo a fazerem de suporte e ligação com o exterior do amortecedor. Só desta forma, se consegue fazer passar o óleo do interior do amortecedor para o circuito de regeneração de energia.

O pistão pensado para este novo amortecedor tem algumas diferenças quando comparado com o pistão inicial. Inicialmente o pistão contém furos calibrados que fazem a passagem de óleo, estes furos são responsáveis pela determinação do coeficiente de amortecimento do amortecedor. No novo pistão eles não terão mais essa funcionalidade, pretendendo-se que o pistão seja um componente estanque.

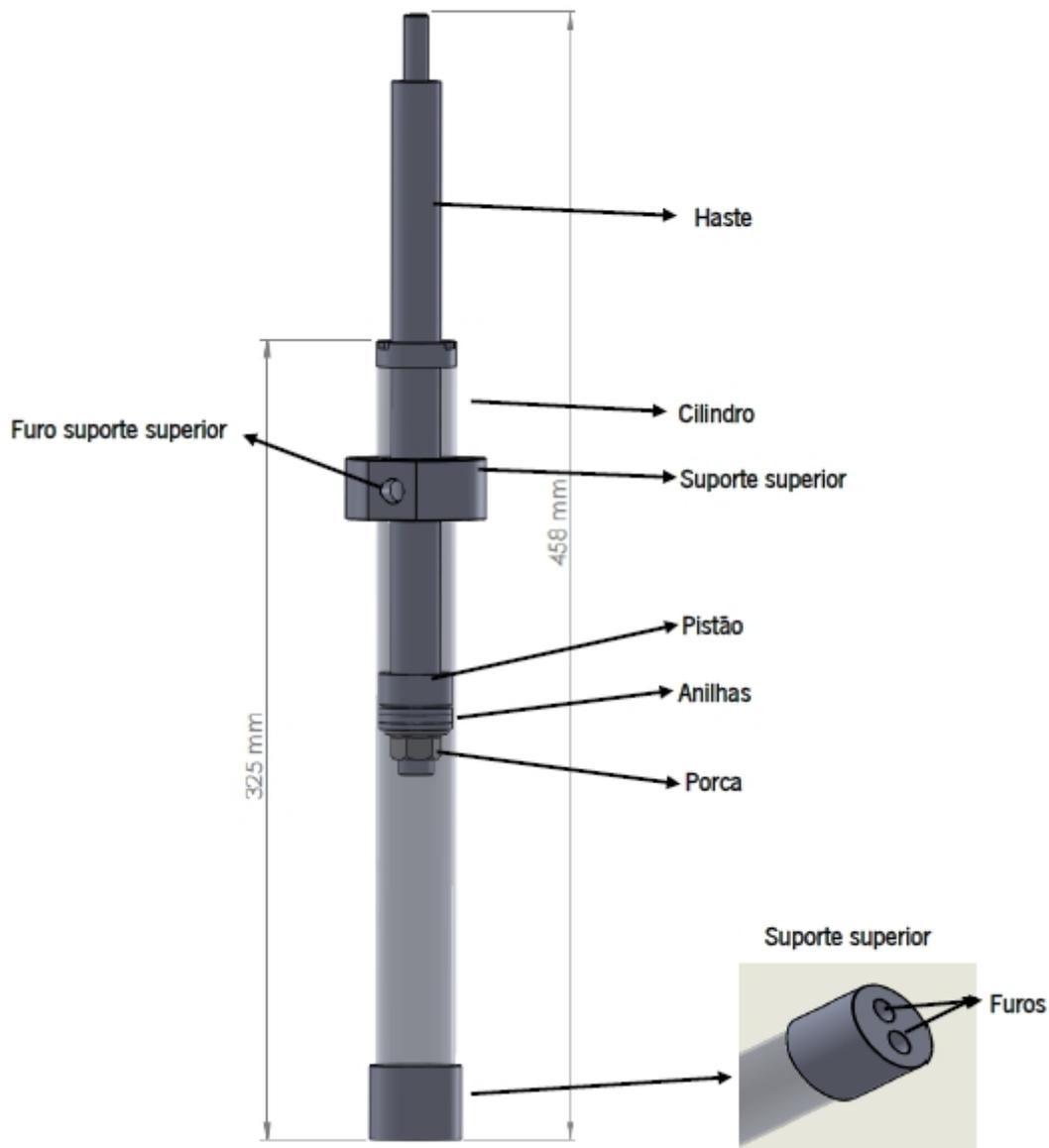


Figura 4.8 Desenho do amortecedor alterado

4.3.1 Suportes para ligar os amortecedores aos racores

Os suportes de ligação são componentes que têm como finalidade ligar o interior do amortecedor ao exterior, onde estarão ligadores mecânicos denominados de racores.

Na concepção destes componentes teve-se em conta dois aspetos fundamentais para o funcionamento do amortecedor. Desde logo, os racores não podem entrar dentro do cilindro, pois poderiam danificar e impedir o movimento do pistão e por outro lado, o posicionamento dos mesmos em relação ao cilindro do amortecedor.

Na figura 4.9 visualiza-se um suporte superior para o racor que fica localizado na parte superior do tubo do cilindro do amortecedor. O suporte superior para o racor tem como função

alojar o racor, por onde atravessa o óleo, no momento em que a haste do amortecedor efetua o movimento de descida ou subida.

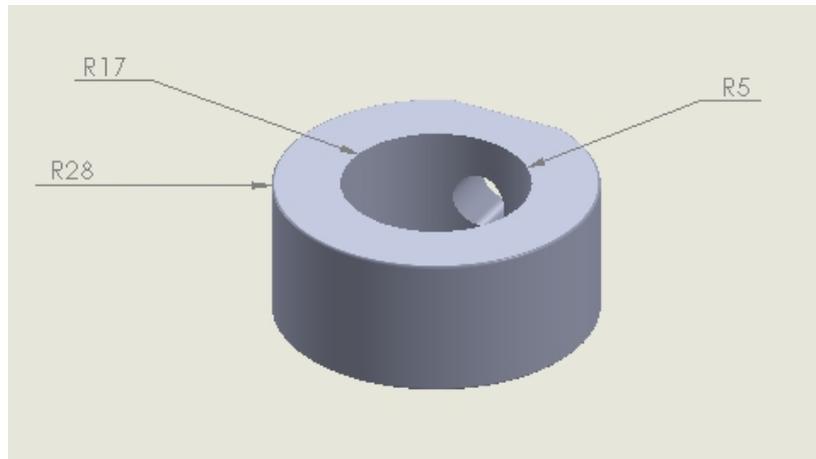


Figura 4.9 Suporte superior

A Figura 4.10 retrata o pormenor do posicionamento que o racor superior assume relativamente ao cilindro do amortecedor.

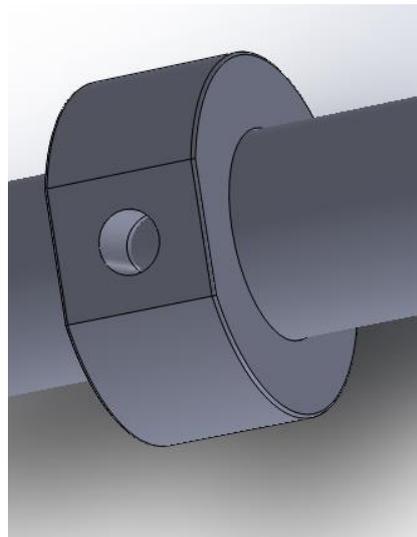


Figura 4.10 Posicionamento do suporte superior no tubo do amortecedor

A Figura 4.11 representa a solução encontrada para o suporte inferior de racores. O suporte inferior tem a funcionalidade de fazer a união entre a parte inferior do tubo do amortecedor e o circuito regenerativo. Este componente foi desenvolvido de forma idêntica ao suporte superior, apresentando diferenças geométricas devido ao seu posicionamento.

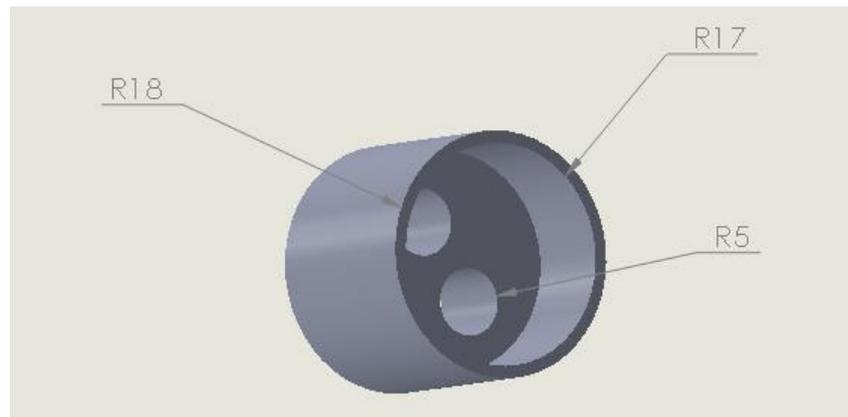


Figura 4.11 Suporte inferior

Ao contrário do suporte superior, o suporte inferior contém dois furos de raio com 5 mm, onde os racores se alojarão posteriormente. A razão pela qual foram efetuados dois furos deve-se à necessidade que um dos furos faça a ligação ao reservatório do óleo, e no outro seja ligado o circuito de recuperação de energia. Na Figura 4.12 pode visualizar-se o posicionamento deste componente.

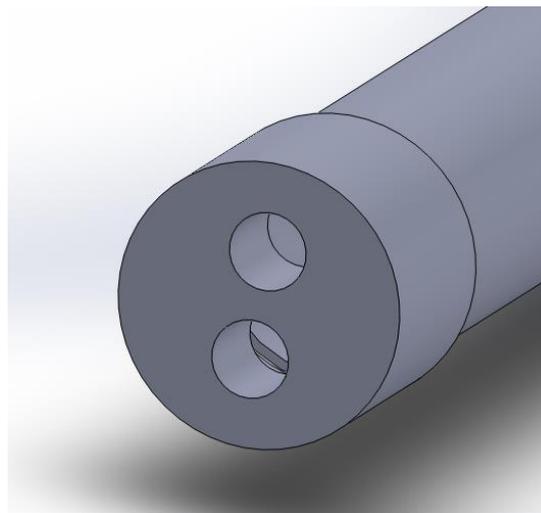


Figura 4.12 Posicionamento do suporte inferior no tubo do amortecedor

Os racores anteriormente referidos e utilizados, para fazerem as ligações do circuito, são acoplamentos rápidos e fazem a ligação com as mangueiras, onde circula o óleo. Deste modo, a Figura 4.13 mostra o racor utilizado, sendo que este componente já se encontrava no Laboratório de Mecatrónica. As características técnicas deste componente encontram-se no Anexo (A)



Figura 4.13 Racor -Parte Macho TEMA 2520- 1/4"

4.4 Construção das peças do amortecedor

Para a realização do fabrico dos componentes, recorreu-se aos equipamentos disponíveis nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica.

Posteriormente, ao desenho do amortecedor e à verificação dos circuitos procedeu-se ao fabrico dos novos componentes que passaram a integrar o amortecedor, isto é, os suportes para os racores.

Os desenhos técnicos utilizados como elemento de auxílio na construção dos novos componentes do amortecedor encontram-se no Anexo B

4.4.1 Tecnologias de fabrico

As tecnologias utilizadas para o fabrico dos componentes foram:

- Torneamento - Processo de fabrico no qual se efetua num torno, fazendo girar a peça em torno do seu eixo. A ferramenta de corte move-se perpendicularmente ou paralelamente ao eixo da peça. [31]
- Fresagem – Processo utilizado com o intuito de se obterem superfícies planas através do avanço de uma ferramenta sobre a mesa fresadora. [31]

A utilização destes processos de fabrico deveu-se pela geometria das peças fabricadas e pela sua rapidez na obtenção das mesmas.

4.4.2 Fabrico do suporte superior

O suporte superior de ligação ao racor destaca-se por ser uma peça cilíndrica com um furo interior e outro localizado lateralmente, onde será aberta uma rosca *a posteriori*.



Figura 4.14 Suporte superior fabricado

O suporte foi feito a partir de um varão em aço (AISI M3 Class 2) através do uso das seguintes operações de maquinagem: torneamento, fresamento e roscagem. A sequência seguida foi:

- Desbaste do varão, efetuado no torno;
- Torneamento exterior;
- Facejamento das faces;
- Abertura do furo interior com uma broca de 29 mm;
- Torneamento do furo interior;
- Sangramento do varão;
- Fresagem da zona lateral;
- Abertura do furo lateral;
- Abertura da rosca no furo lateral com auxílio de um macho manual em aço rápido ¼" BSPF.

A utilização da fresagem para a construção deste suporte ocorreu pela necessidade de proporcionar uma maior de apoio do racor ao suporte e evitar possíveis fugas de óleo.

4.4.3 Fabrico do suporte inferior

Este suporte é uma peça cilíndrica, como se verifica na Figura 4.15. Na figura é possível visualizar-se dois tipos de furos. Um furo interior, localizado na zona superior e dois furos de com ¼" de diâmetro onde serão roscados os racores com um passo de 19 fios por polegada.



Figura 4.15 Desenho e suporte inferior fabricado

A sequência de maquinagem para a obtenção deste componente é um pouco semelhante àquela realizada no fabrico do suporte superior, com as devidas diferenças. Assim temos,

- Desbaste do varão, efetuado no torno;
- Torneamento exterior;
- Facejamento das faces;
- Sangramento do varão;
- Torneamento do furo interior até a cota de 15 mm;
- Abertura dos furos, na fresa;
- Abertura da rosca, com auxílio de um macho manual em aço rápido ¼" BSPF.

4.5 Transformação do pistão do amortecedor em êmbolo

O amortecedor convencional contém um pistão no seu interior, que deixa passar o óleo desde o lado sob pressão para a zona da câmara com baixa pressão.

Para se proceder à alteração do pistão no amortecedor, procedeu-se ao fecho dos orifícios do pistão através de anilhas. Esta solução é visível na Figura 4.16.



Figura 4.16 Constituição do pistão do amortecedor regenerativo

As anilhas selecionadas são em aço zincado M10 pertencentes à norma DIN 9021, as dimensões exatas para permanecerem dentro do cilindro, deslizando na câmara sem causar desgaste nas suas paredes. Permitem ainda, que não haja passagem de óleo através dos orifícios no interior do pistão.

A Figura 4.17 ilustra os componentes que fazem parte do pistão do amortecedor regenerativo.

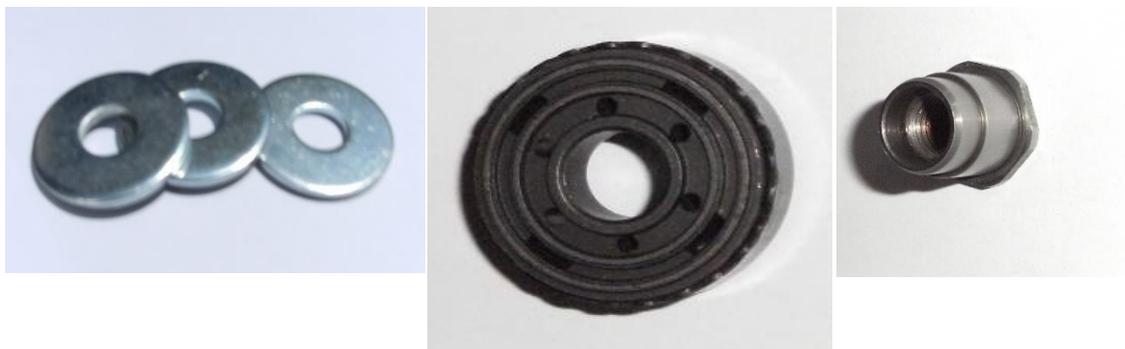


Figura 4.17 Anilhas, pistão e porca de aperto

Por forma a conseguir construir-se um componente estanque, tendo como limitação os componentes existentes foram necessárias três anilhas.

4.6 Fixação dos suportes ao amortecedor

A fixação dos suportes ao amortecedor foi a última operação a ser efetuada. Não menos importante que as anteriores, esta operação é vital para o bom funcionamento do amortecedor. A principal preocupação, na escolha do método de fixação, foi a seleção de um processo que não

colocasse em risco a integridade dos componentes do amortecedor, e por outro lado, garantisse a total estanquicidade do amortecedor, evitando a existência de fugas de óleo.

Deste modo, optou-se pela fixação dos componentes através de soldadura. Pensou-se que desta forma garantir-se-ia a estanquicidade do amortecedor. Um outro fator relevante na seleção do processo de soldadura foi a necessidade de garantir a cilindridade do cilindro. As preocupações acima descritas têm a ver com a espessura da parede do cilindro. Perante esta realidade, o processo de soldadura utilizado foi o de arco elétrico com arco submerso, que relativamente a outros (TIG, MIG, MAG) garantia menores temperaturas e uma menor probabilidade de haver problemas com os componentes do amortecedor.

O primeiro suporte a ser soldado ao cilindro do amortecedor foi o suporte para o racor superior. Por forma a garantir-se um correto posicionamento do suporte ao cilindro, roscou-se primeiramente o racor “contra” a parede do cilindro. Depois, do posicionamento estar efetuado, passou-se então ao processo de soldadura. Na Figura 4.18 (a), pode ser visto o pormenor da soldadura efetuada.

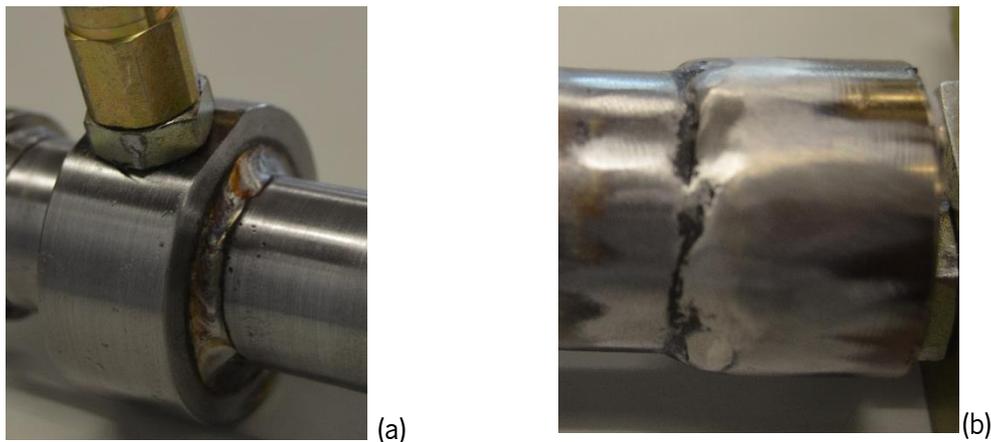


Figura 4.18 Pormenor das soldaduras executada para fixar o suportes

Depois de a soldadura ter sido executada, efetuou-se, na máquina de furar de coluna, o furo na parede do cilindro, para se conseguir uma ligação com o exterior. Para a soldadura do suporte inferior, localizado na base do amortecedor, os componentes da haste já se encontravam previamente montados. Em seguida, alojou-se a haste no interior do cilindro, passando esta para o topo superior na sua distensão máxima. Com esta solução tentou evitar-se que a temperatura resultante do processo de soldadura danifica-se o pistão.

Para a execução da soldadura do suporte inferior teve de se posicionar o suporte inferior, e depois de garantido este posicionamento, de mais fácil execução que o anterior, procedeu-se à soldadura, cujo resultado final está patente na Figura 4.18 (b).

4.7 Amortecedor regenerativo finalizado

Posteriormente ao desenvolvimento dos componentes e conseqüentemente fabrico e montagem dos mesmos ficamos com o protótipo de amortecedor regenerativo concluído.

O amortecedor finalizado está apresentado na Figura 4.19. Da análise ao amortecedor finalizado pode ser visto o posicionamento definitivo dos racores, um pouco diferente da situação idealizada. Com esta adaptação inseriu-se um terceiro elemento para que nos testes óleo-hidráulicos fosse mais fácil e possível monitorizar a pressão de saída do amortecedor.

Destaca-se de relevante importância é a utilização de manguerias. Estas servem para unirem, na montagem do circuito regenerativo, a bancada de testes óleo-hidráulicos e o amortecedor. Através da Figura 4.19 poder-se-á ver como ficaram as manguerias posicionadas relativamente ao amortecedor.

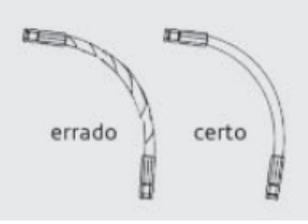
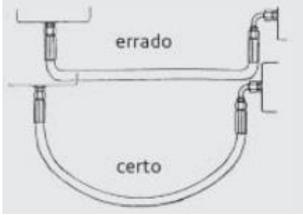
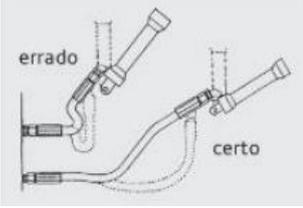
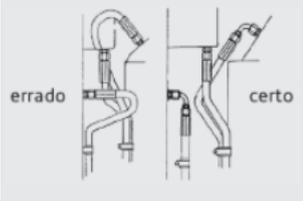
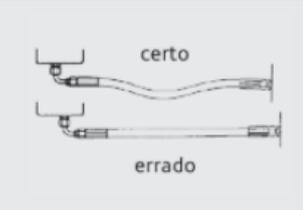
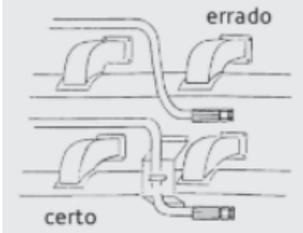
Os acoplamentos das manguerias, são os elementos intermediários que fazem ligação com a bancada de ensaios bem como o amortecedor é um componente já cravado na mangueria. Tendo este a principal característica proporcionar uma rápida, eficaz e fácil ligação.



Figura 4.19 Amortecedor finalizado com o pormenor dos racores e manguerias

O posicionamento das manguerias deve ser feito de forma cuidada para não existirem problemas com a circulação de óleo. Dever-se-á ter em consideração os aspetos da Tabela 1

Tabela 1 Posicionamento recomendado da mangueira [32]

Descrição	Posicionamento
<p>Deve ser evitada uma posição que provoque um esforço de torção na mangueira. Havendo o risco da mangueira se soltar</p>	
<p>Deve ser evitado um raio de curvatura menor que o indicado pelo fabricante, de modo a reduzir o estrangulamento do caudal</p>	
<p>Quando a mangueira estiver montada numa aplicação móvel, deve ser criada uma área suficiente que permita o seu livre movimento</p>	
<p>O uso de curvas rígidas ou outros tipos de adaptadores permite uma redução do comprimento da mangueira assim como possibilita uma fácil manutenção</p>	
<p>Devido à possibilidade de variação do comprimento deve em 2% deve ser dada uma folga durante a instalação.</p>	
<p>A mangueira deve ter um isolamento térmico, no caso de estar perto de fontes de calor</p>	

4.8 Ensaio práticos

Depois do amortecedor construído, um dos objetivos deste trabalho foi testar o princípio de funcionamento do amortecedor regenerativo, integrando-o no sistema de recuperação de

energia. O amortecedor foi montado na bancada de ensaios da Gustavo Cudell, no laboratório de Automação, ver Figura 4.20.

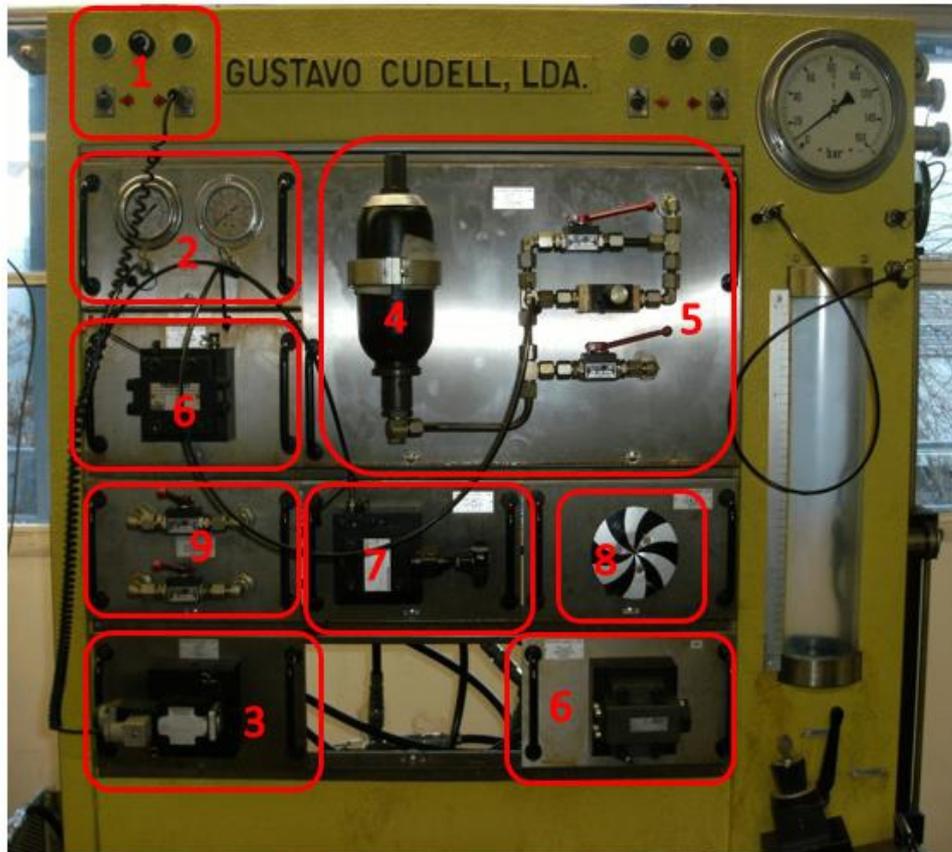


Figura 4.20 Bancada de testes óleo-hidráulicos Gustavo Cudell; 1- Botão de acionamento; 2- Manômetros de pressão; 3- Eletroválvula; 4- Acumulador Hidráulico; 5- Válvula manual; 6- Válvula anti-retorno; 7- Válvula reguladora de pressão; 8- Motor hidráulico; 9- Válvula manual.

Os objetivos do ensaio do amortecedor são:

- Verificar o funcionamento do amortecedor;
- Testar o funcionamento do circuito regenerativo apresentado na figura 4.4;
- Identificar o volume de óleo que se consegue acumular;
- Verificar o número de rotações que se podem realizar no motor hidráulico.

Depois do circuito instalado procedeu-se ao teste prático. No entanto, a primeira tentativa foi falhada, pois a tampa que guia a haste não conseguiu resistir à pressão gerada no interior do cilindro do amortecedor, como se pode verificar na Figura 4.21

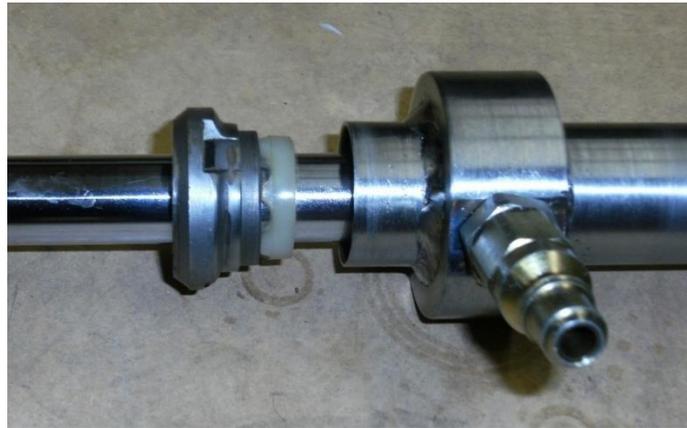


Figura 4.21 Guia da haste

Por forma a contornar a avaria ocorrida, procurou-se uma solução que pudesse substituir o amortecedor danificado. A alternativa foi encontrada na própria bancada de testes óleo-hidráulicos, que está equipada com um cilindro hidráulico, Figura 4.22 Cilindro da banca de ensaios. Este cilindro hidráulico funcionou como substituto do amortecedor, uma vez que ele permitia a entrada e saída do óleo, conseguindo reproduzir-se desta forma as funções do amortecedor. Esta solução permitiu que os testes ao sistema fossem retomados rapidamente, e se procedesse à verificação dos circuitos esquematizados no capítulo 4 nas secções 4.2.2 e 4.2.3.



Figura 4.22 Cilindro da banca de ensaios

Após várias tentativas, a partir dos testes efetuados verificou-se que o circuito regenerativo implementado comprovava os circuitos elaborados nas secções 4.2.2 e 4.2.3. No entanto, a pressão e volume de óleo acumulados eram muito pouco, só permitindo que o motor rodasse um número reduzido de rotações (entre 2 e 3 rotações), num curto tempo. Os ensaios foram repetidos verificando-se uma avaria do acumulador. A avaria observada no acumulador estava relacionada

com o tempo de inutilização deste componente, que levou à inexistência de pressão do gás e/ou a rompimento da membrana.

5. Capítulo

CÁLCULOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão efetuados os cálculos utilizados para a seleção dos componentes hidráulicos. Os principais componentes hidráulicos existentes no circuito regenerativo serão o motor hidráulico e o acumulador de pressão.

5.1 Estrada

As estradas por onde circulam os veículos são responsáveis por grande parte das vibrações sofridas e determinam as excitações das suspensões.

A rugosidade dos pavimentos segundo Gillespie [33] é uma relação entre as limitações técnicas da construção do pavimento, referentes aos limites práticos para os quais é construída e conservada, e os defeitos localizados, como por exemplo, os buracos. As elevações são as rugosidades do pavimento, alterando-se de forma aleatória ao longo da estrada, fazendo com que a representação aproximada seja efetuada segundo uma análise estatística.

Uma composição de espectro sinusoidal de vários números de onda está na generalidade compreendida entre 0,016 ciclos/m e 1,6 ciclos/m podendo assim representar-se o perfil de uma estrada para simulações. Contudo, a forma mais usada para representar um perfil de uma estrada é a PSD (*Power Spectral Density*) [34]. A função PSD é uma representação estatística, onde a estrada é uma combinação de um grande número de elevações periódicas de variada dimensão, com diferentes amplitudes.

Para realizar os cálculos relativos à suspensão regenerativa foi necessário conhecer previamente o número de solicitações (ciclos/m) que cada tipo de estrada impõe ao sistema de suspensão. Foram então utilizados os valores apresentados na Tabela 2, construídos por Edison da Rosa [35] onde C é a rugosidade da estrada expressa em (m) e N em (ciclos/m).

Tabela 2 Diferentes tipos de estrada e n° de ciclos [35]

Descrição	C [m]	N [ciclos/m]
Estrada Boa	$4,4 \times 10^{-6}$	2,1
Estrada Média	$8,1 \times 10^{-6}$	2,1
Estrada Pobre	$6,5 \times 10^{-4}$	1,6

5.2 Cálculo das forças no amortecedor

A dissipação de energia no amortecedor é criada pela resistência que o fluido que circula (óleo) oferece à força aplicada no amortecedor. A resistência causada pelo amortecedor diminui a velocidade do pistão, que faz com que quanto maior a velocidade a que o pistão se move, maior é a resistência criada pelo amortecedor. Os amortecedores hidráulicos seguem o comportamento aproximado do modelo matemático do tipo viscoso. [3]

$$F = c \cdot v \quad (1)$$

Onde F representa a força aplicada no amortecedor, v a velocidade a que o pistão do amortecedor se desloca, e c o coeficiente de amortecimento viscoso. O coeficiente viscoso utilizado nos cálculos foi obtido através de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais. O coeficiente de amortecimento viscoso do amortecedor

$$c_{comp.} \cong 645 \text{ N} \cdot \text{s/m}$$

Assim, podemos visualizar a curva característica de trabalho do amortecedor utilizado para o estudo, na Figura 5.1.

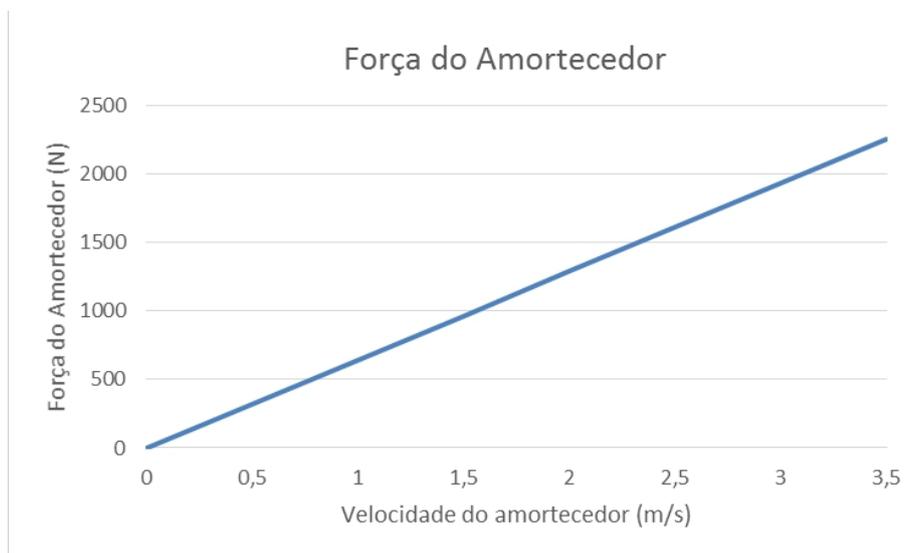


Figura 5.1 Curva do amortecedor à compressão

5.3 Cálculo das forças da mola

A mola utilizada no sistema de suspensão projetado é em aço e helicoidal. Quando o veículo está parado, a altura deste ao solo é determinada pela carga que a massa do veículo impõe

às molas. A energia absorvida por uma mola helicoidal linear depende do deslocamento provocado e da força aplicada.

A constante de elasticidade da mola é obtida através da utilização da Lei de Hooke, que contempla as deformações e as forças de todos os componentes sujeitos a ações mecânicas, sempre no domínio plástico. [11] A constante de elasticidade da mola foi obtida experimentalmente nos realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade do Minho no âmbito de uma tese de dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho realizada no ano de 2012. [29]

A curva característica da mola segue a seguinte equação:

$$k = \frac{F - F_i}{y - y_i} \quad (2)$$

Onde F representa a força total aplicada na mola, F_i representa a força inicial a que a mola está sujeita, y representa a deformação máxima da mola, y_i a deformação inicial da mola, e k é a constante elástica da mola.

Quando a mola não está sujeita a nenhum tipo de esforço ou carga, não sofrerá qualquer tipo de deformação, pelo que

$$F = kx \quad (3)$$

Dos resultados alcançados pela análise à mola do sistema de suspensão traseiro foi possível a obtenção do valor da constante elástica da mola:

$$k = 25,2 \text{ k N/m}$$

A curva de trabalho característico da mola em estudo está representada na Figura 5.2

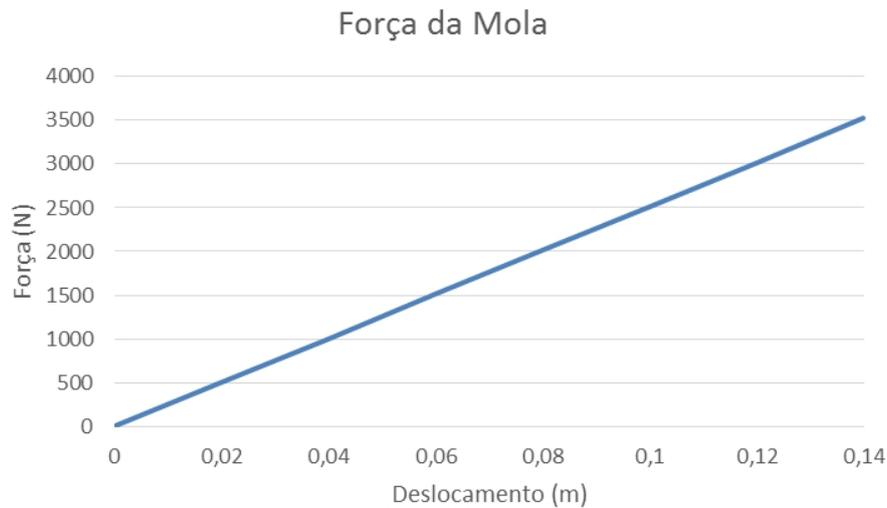


Figura 5.2 Trabalho característico da mola

A mola foi montada num sistema de suspensão com uma pré-tensão que a deforma em 60mm. Quando realiza trabalho, a mola suporta uma força de 2,75kN, sendo que o somatório das forças faz com que a curva característica de trabalho da mola, montada no sistema de suspensão, apresente inicialmente uma pré-carga que deforma a mola em 49,2 mm do seu comprimento total, que é equivalente a uma força de aproximadamente 1,24 kN.

5.4 Cálculo do conjunto das forças mola-amortecedor

No conjunto mola-amortecedor, a equação é dada pelo somatório da força da mola com a força do amortecedor, assim sendo:

$$F = 25174 \cdot x + 644,51 \cdot v \quad (4)$$

Onde x representa o deslocamento em m, v a velocidade m/s e F a força em N.

A Tabela 3, elaborada com recurso ao *software Excel*®, apresenta as forças obtidas para diferentes velocidades e deslocamentos.

Tabela 3 Forças da Suspensão

Cálculos das Forças da Mola-Amortecedor

F [N]	x [m]	v [m/s]
825,74	0,02	0,5
1651,47	0,04	1
2477,21	0,06	1,5
3302,94	0,08	2
4128,68	0,1	2,5
4954,41	0,12	3
5780,15	0,14	3,5

Por outro lado, a força média a que a suspensão se encontra sujeita é dada pela expressão:

$$\bar{F} = \sum_i^n \frac{F_n}{n} \quad (5)$$

Sendo que o valor obtido é,

$$\bar{F} = 3302,94 \text{ (N)}$$

5.5 Cálculo da pressão no amortecedor

A determinação da pressão do amortecedor é importante, no sentido em que será um dos principais requisitos para a seleção do acumulador.

A pressão do amortecedor é variável mediante as forças do amortecimento a que este estará sujeito, sendo determinada pela seguinte expressão:

$$P = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Onde, P é a pressão (bar), F a força (N) e A a área (m²).

A área é determinada pela equação:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (7)$$

Estando o raio diretamente relacionado ao diâmetro interior do cilindro, a equação (7) transforma-se em:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (8)$$

Para o diâmetro interior do cilindro de 0,0302 m, a área é dada por:

$$A = 0,00071 \text{ m}^2$$

No trabalho foram determinadas pressões para as forças anteriormente calculadas, resultando assim os valores apresentados na Tabela 4. Destes resultados, foram selecionados três valores representativos das pressões médias que ocorrem nos diferentes tipos de estrada apresentadas na Tabela 2.

Forças da Suspensão [N]	Pressão [bar]
825,735	11,76
3302,94	47,05
5780,145	82,34

5.6 Quantidade de óleo à saída do amortecedor

A quantidade de óleo que sai do amortecedor representa o volume de óleo que o amortecedor liberta, a cada golpe que executa. É esta a quantidade de óleo que irá entrar no acumulador até que ele adquira as condições de pressão e volume adequadas para ser aproveitado.

Para se determinar o volume de óleo, que o acumulador retém no seu interior, é necessário obterem-se os valores de volume que cada golpe do amortecedor origina. Através dos valores da Tabela 2 sabe-se o deslocamento que a estrada impõe ao amortecedor.

Assumindo que um veículo se desloca nos três tipos de estrada estabelecidos para o projeto, a velocidade do veículo varia de acordo com a estrada que é percorrida. Foram admitidas as velocidades de 120 km/h para a estrada boa, 80 km/h para a estrada média e 40 km/h para a estrada pobre. Desta forma, o número de ciclos por segundo é dado por:

$$N_s = v \cdot N \text{ [ciclos/s]} \quad (9)$$

Os valores obtidos foram de 70 ciclos/s para uma velocidade de 120 km/h, 47 ciclos/s para uma velocidade de 80 km/h e 18 ciclos/s para uma velocidade 40 km/h.

A velocidade de deslocamento [v_d] que os quatro pistões fazem no interior do amortecedor é dada equação (10)

$$v_p = 4 \cdot N_s \cdot C \text{ [m/s]} \quad (10)$$

Para se determinar o volume de óleo inserido no acumulador multiplica-se a velocidade dos quatro pistões pela área dada pela equação (8) do amortecedor.

Foram obtidos os valores apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 Velocidade de 4 Pistões e volume de óleo inserido no acumulador		
Velocidade [km/h]	Velocidade de 4 Pistões [m/s]	Volume de óleo inserido [l/s]
120	$1,232 \times 10^{-4}$	$8,825 \times 10^{-4}$
80	$1,51 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-3}$
40	0,046	0,033

5.7 Cálculo do Acumulador

Para realizar os cálculos necessários para a seleção do acumulador foi utilizado o método de dimensionamento do acumulador de vesícula, que funciona de forma semelhante ao de bexiga. [16] Na Figura 5.3 poder-se-á ver comportamento de um acumulador de bexiga.

p_0 – Pressão de carga inicial do gás

V_0 – Volume do acumulador (capacidade volúmica do acumulador)

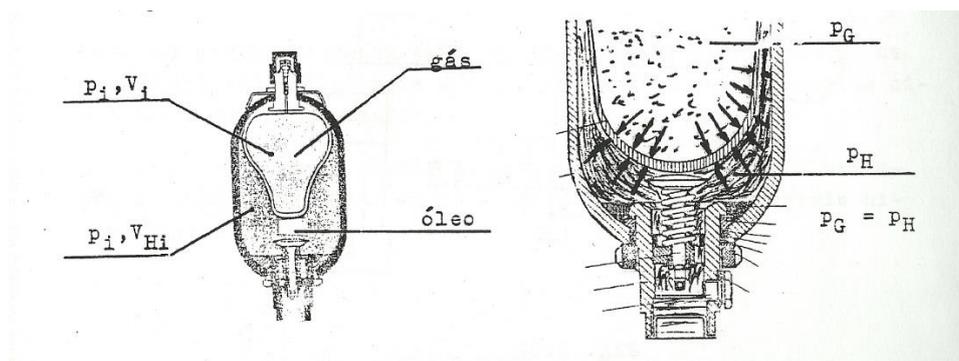


Figura 5.3 Diagrama de pressões e volumes do acumulador

Inicialmente o acumulador é carregado com gás inerte à pressão p_0 , fazendo com que a bexiga se dilate até tocar no invólucro metálico do acumulador. Quando a pressão do óleo no amortecedor aumenta até ao valor de p_1 , superior a p_0 , o óleo irá entrar no acumulador e deste modo a comprimir a bexiga. Assim, a pressão do gás p_0 aumentará até igualar p_1 equilibrando as forças areolares atuantes na parede flexível da bexiga. Com a entrada de nova quantidade de

óleo no acumulador a pressão hidráulica é aumentada até p_2 , e teremos o aumento correspondente na compressão do gás. Teremos, assim, três estados sucessivos da transformação. Sendo que o sistema de carregamento do acumulador é relativamente lento, considerou-se um regime isotérmico que obedece à seguinte lei:

$$p_0 \cdot V_0 = p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (11)$$

Considerando a construção do acumulador obtém-se a seguinte relação:

$$V_0 = V_1 + V_{H1} = V_2 + V_{H2} \quad (12)$$

Da equação 12 temos, V_0 que é o volume inicial e representa apenas o volume inicial dilatado da bexiga. V_1 representa o volume da bexiga na situação seguinte e V_{H1} representa o volume de óleo que entrou no acumulador, analogamente o mesmo também se verifica para as próximas condições (interações).

O volume de óleo admitido pelo acumulador será determinado iterativamente, para cada golpe que o amortecedor realize. Sendo que, para ser possível inserir óleo é necessário que o próximo golpe promova uma pressão superior à existente no acumulador. Se não se verificar esta condição, não entrará óleo no acumulador.

A pressão de carga inicial do acumulador (p_0) tem de ser menor que o valor inferior do intervalo de pressão no sistema hidráulico para o qual se pretende acumular óleo no acumulador, para assim garantir a existência de óleo no interior do acumulador para todos os pontos de atuação de funcionamento do intervalo de pressões.

Com a intenção de retirar maior aproveitamento do volume disponível então p_0 terá de ser próximo de p_1 . Tendo então os valores de carga

$$p_0 \cong 0,9 \cdot p_1 \quad (13)$$

A Figura 5.4 representa o gráfico de segurança para determinar a quantidade de óleo que o acumulador poderá admitir no seu interior. Este é utilizado como meio de segurança para não se exceder as capacidades limitativas impostas pelos fabricantes.

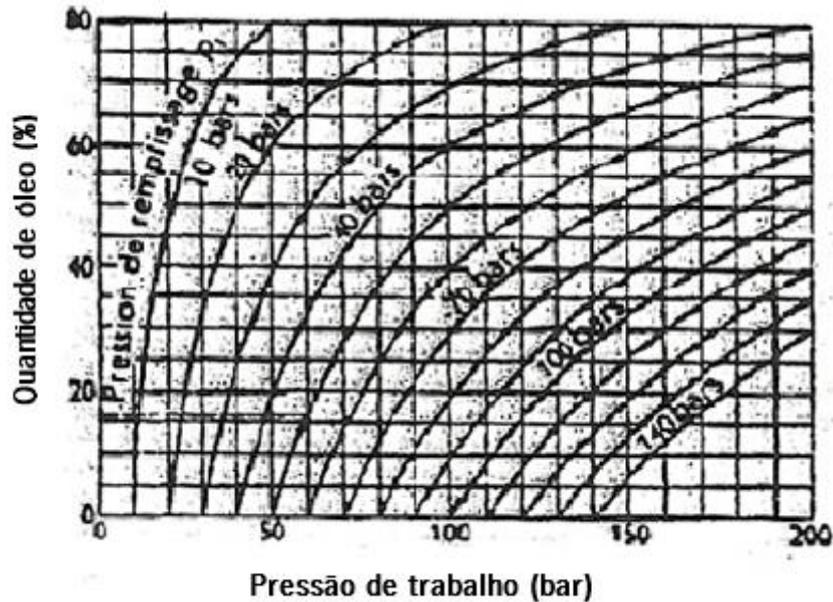


Figura 5.4 Gráfico da quantidade de óleo admitida no acumulador [16]

Desta forma, para as pressões de trabalho (ver Tabela 4) apresenta-se a Tabela 6 que indica qual a percentagem de volume de óleo que um determinado acumulador pode admitir.

Tabela 6 Percentagens de volume de óleo para as pressões de funcionamento do amortecedor

Pressão de trabalho [bar]	p_0 [bar]	$p_{máx}$ [bar]	% Quantidade de óleo
11,76	10,6	50	80
47,05	42,35	200	75
82,34	74,1	200	60

Para se determinar qual o volume de óleo que o acumulador pode admitir utilizou-se a seguinte equação (16).

$$V_{total\ de\ óleo} = V_0 \times Quantidade\ de\ óleo\ admitida\ (\%) \quad (14)$$

Foram selecionados dois acumuladores com volumes diferentes, um com 5 l (AS 5) e outro com 10 l (AS 10), Anexo A, do fabricante Epoll do catálogo Gustavo Cudell. [32] A razão da sua escolha prende-se com o facto de estes serem um melhor compromisso entre volume e peso, de modo a não comprometer de forma significativa a performance do veículo.

5.8 Seleção e cálculos do motor óleo-hidráulico

Foi selecionado um motor óleo-hidráulico que uma cilindrada de 11,5 cm³. A referência dele é A70 MOTOR da ROTARY POWER, cujas curvas características estão representadas na Figura 5.5.

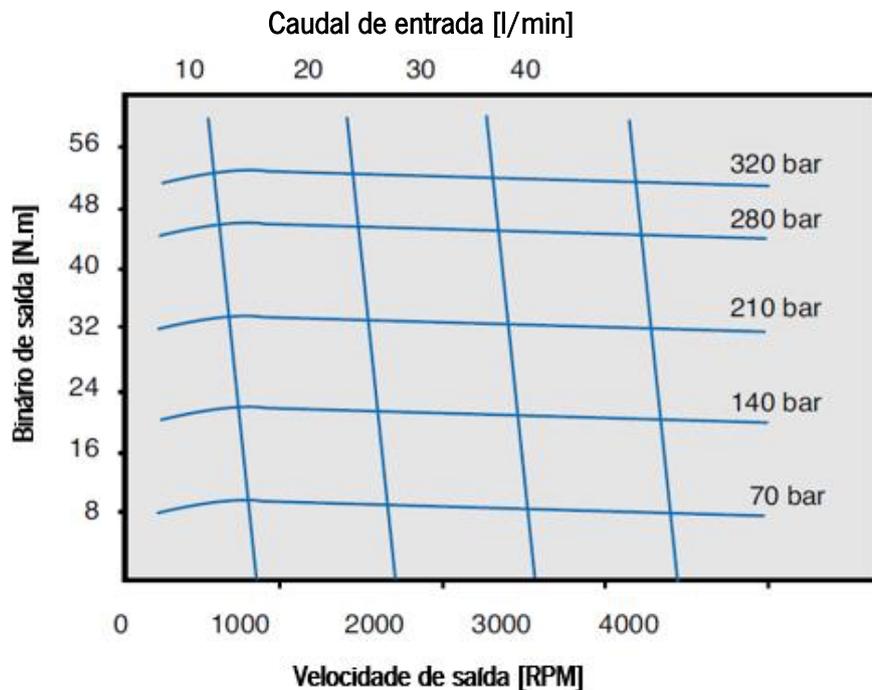


Figura 5.5 Características do motor hidráulico [15]

A seleção do motor fez-se de acordo com o caudal, binário de saída e velocidade de saída e está relacionada com a descarga do acumulador, este facto é limitativo dos valores obtidos. No sistema regenerativo, o motor é o componente produtor de binário consequentemente de energia a fornecer ao sistema.

Assim, temos que o binário fornecido (M) pode ser obtido por:

$$M = \frac{\Delta p \cdot V \cdot \eta_{hm}}{20\pi} [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (15)$$

$$M = \frac{(p_{m\acute{a}x} - p_{m\acute{i}n}) \cdot V \cdot \eta_{hm}}{20\pi} [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (16)$$

Onde Δp é a variação de pressão, $p_{m\acute{a}x}$ a pressão à saída do acumulador e $p_{m\acute{i}n}$ a pressão à saída do motor hidráulico. A cilindrada é dada por V e o rendimento por η_{hm} rendimento hidromecânico.

Nos cálculos realizados consideraram-se diferentes $p_{m\acute{i}n}$, por forma a que se conseguisse obter maior binário de saída do motor e um melhor aproveitamento do trabalho realizado pela suspensão. Foram então selecionadas as pressões de 5 bar e 10 bar.

Através do caudal de trabalho do motor hidráulico (Q) e do volume de óleo acumulado (V) obtém-se o tempo de esvaziamento do acumulador.

$$T_{esvaziamento} = \frac{V}{Q} [\text{l/min}] \quad (17)$$

A potência gerada pelo motor hidráulico é dada por:

$$P = \frac{\Delta p \cdot Q \cdot \eta_g}{600} [\text{kW}] \quad (18)$$

Para efeitos de cálculo foram considerados os valores para o rendimento global de 0,2 e para o rendimento hidromecânico de 0,95.

5.9 Cálculo da energia

Para se determinar a energia que o sistema regenerativo produz comparativamente à energia que um veículo gasta ao percorrer uma determinada distância, estipulou-se um consumo médio que um veículo em litros, por 100 km percorridos.

Consideraram-se os valores de Poder Calorífico Inferiores (PCI) do gasóleo do *despacho 17313 de 2008*, para a determinação da energia total proveniente do gasóleo. Os valores do PCI utilizados para se determinar a energia relativa à gasolina e ao gasóleo estão considerados na Tabela 7.

Combustível	Densidade ρ [kg/l]	PCI [MJ/kg]
Gasóleo	0,835	43,3
Gasolina	0,72	44,5

A energia, (E_{comb}) (MJ/l), que cada litro de combustível contém é definida pela equação 19. De onde, ρ representa a densidade do combustível em kg/l e o poder calorífico inferior (PCI) é dado por MJ/kg.

$$E_{comb} = \rho \times PCI \quad (19)$$

Foi necessário saber-se qual a energia que cada combustível inserido num depósito de um veículo converte em trabalho, ou seja, a energia utilizada para realizar movimento no veio motriz. A média de consumo considerada nos cálculos foi de 7 l aos 100 km.

Segundo o autor Jorge Martins, os valores das energias em jogo no teste de um motor são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 Balanço de energia de motores debitando 100 kW ao veio motor [36]

		Entradas	Saídas	
Motor a gasolina	Combustível 300 kW	Veio	100 kW	
		Gases de escape	90 kW	
		Água de arrefecimento	90 kW	
		Conv. e radiação	20 kW	
		TOTAL		300 kW
Motor a Diesel	Combustível 260 kW	Veio	100 kW	
		Gases de escape	70 kW	
		Água de arrefecimento	70 kW	
		Conv. e radiação	20 kW	
		TOTAL		260 kW

Da Tabela 8 pode concluir-se que um motor a gasolina tem um rendimento de 30% e um motor Diesel tem o rendimento de 40%. Estes valores indicam que apenas essas percentagens de combustível são utilizadas para realizarem o binário no veio motriz.

5.10 Resultados teóricos

Os resultados obtidos foram determinados para diferentes situações de funcionamento do sistema. Foram considerados dois acumuladores volumetricamente diferentes, um de 5 l e outro

de 10 l. Por outro lado, foi considerado que um veículo circulava em diferentes estradas (boa, média, e pobre), fazendo um percurso de 100 km.

A velocidade a que este veículo circula depende do tipo de estrada que é percorrido. Foram atribuídas as seguintes velocidades de andamento para cada tipo de percurso ver Tabela 9.

Tabela 9 Velocidade por tipo de estrada

Tipo de Estrada	Velocidade [km/h]	Tempo [s]
Estrada Boa	120	3000
Estrada Média	80	4500
Estrada Pobre	40	9000

Os cálculos foram divididos em duas etapas distintas, o carregamento e a descarga do acumulador. No final, foram ainda apresentadas as energias que o sistema produziu.

5.10.1 Resultados para acumulador de 5 litros

Na Tabela 10 apresentam-se os valores obtidos das iterações efetuadas de modo a conseguir encher um acumulador de 5 l. A tabela está dividida por tipos de estrada. Nela encontram-se dados como: a pressão a que o gás é inserido no acumulador, o volume que teoricamente se podia acumular e o volume de óleo que foi acumulado. Onde também constam os valores do tempo que o amortecedor demora, para cada tipo de estrada, a encher o acumulador. No Anexo D estão os valores obtidos em cada iteração.

Tabela 10 Resultados para o enchimento do acumulador de 5 l

Tipo de estrada	Pressão de enchimento Gás (p_0) [bar]	Quantidade de óleo teórica	Volume de óleo inserida no acumulador [l]	Tempo de enchimento [s]	Pressão acumulada [bar]
Boa	10,59	4,00	0,50	564	11,76
Média	42,35	3,75	0,58	539	47,94
Pobre	74,11	3,00	0,50	15	82,28

Dos valores obtidos das iterações que simulam o tempo de trabalho do amortecedor a Figura 5.6 apresenta a evolução da pressão no acumulador de 5 l ao longo do tempo.

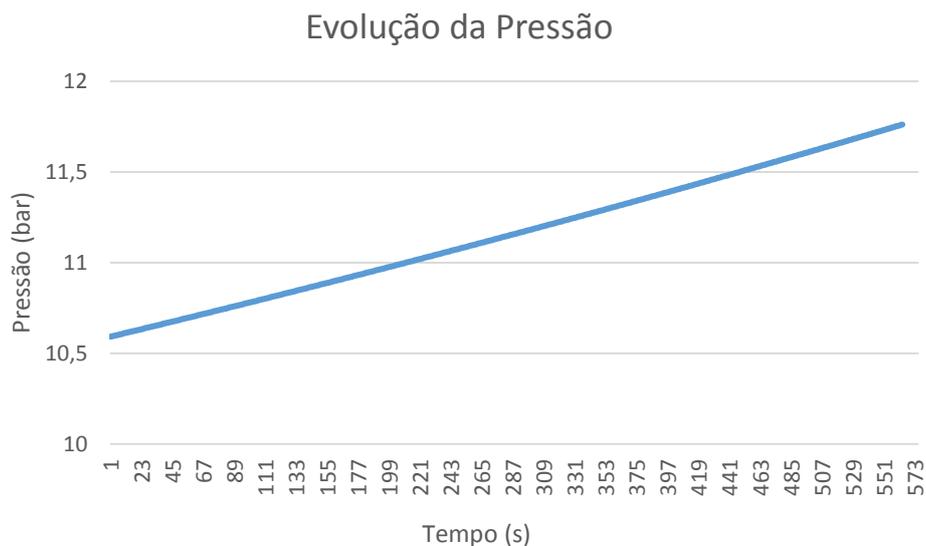


Figura 5.6 Evolução da pressão em uma estrada boa

Da evolução da pressão apresentada na Figura 5.6, referente ao percurso numa estrada boa, verifica-se que a pressão inicial do acumulador é de 10,6 bar, chegando a 11,76 bar. A evolução da pressão ocorre durante 564 segundos.

Na Figura 5.7 apresenta-se uma comparação entre o comportamento do volume da bexiga e o do óleo inserido no acumulador.

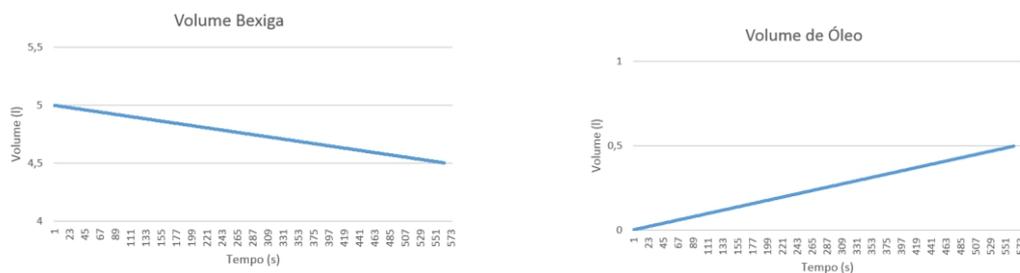


Figura 5.7 Volume da bexiga e de óleo no acumulador

Da análise do comportamento dos volumes da Figura 5.7 observa-se que à medida que o volume da bexiga diminui, o volume de óleo inserido no acumulador atinge os 0,5 l de óleo. Estes movimentos observaram-se no mesmo período verificado na evolução da pressão no acumulador.

Quando o veículo se desloca numa estrada média onde a rugosidade da estrada aumenta, o comportamento da pressão pode visualizar-se na Figura 5.8.

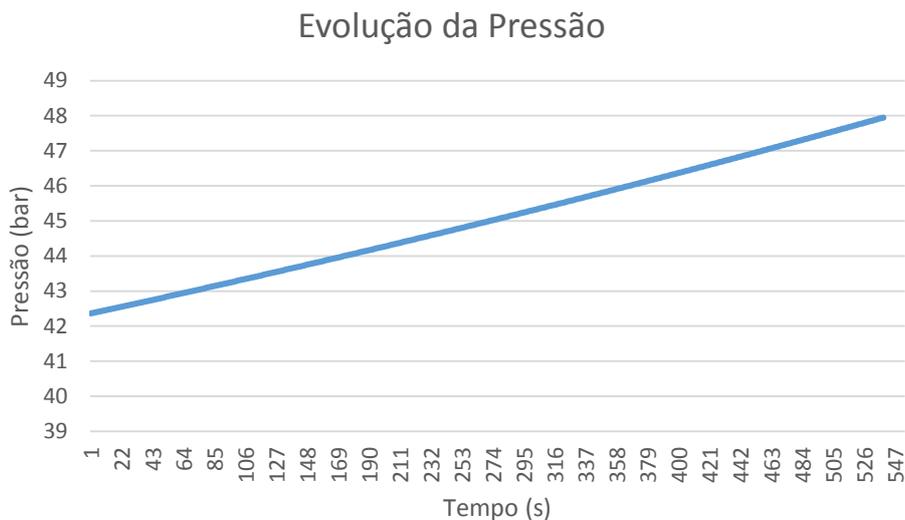


Figura 5.8 Evolução da pressão em uma estrada média

Da análise à Figura 5.8, verifica-se que a pressão inicial passa de 42,35 bar para 47,94 bar, num tempo de 539 segundos. Comparativamente à situação expressa na Figura 5.6 existe uma diminuição do tempo de enchimento. O comportamento do volume de óleo inserido no acumulador e do volume da bexiga é ilustrado pela Figura 5.9.

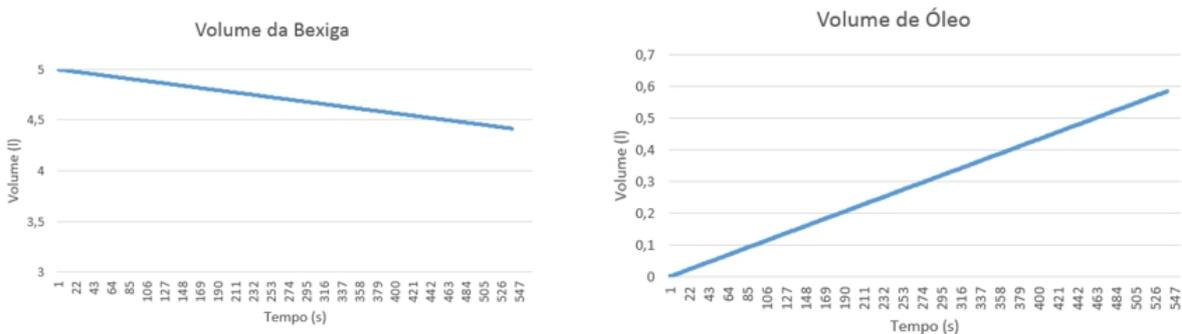


Figura 5.9 Volume da bexiga e de óleo no acumulador

Através da Figura 5.9 pode ver-se que o volume de óleo inserido no acumulador é de 0,58l, que fica aquém do valor máximo que podia ter, isto é, 3,75 l. O volume que a bexiga assume ocupa o espaço maioritário. Contudo, nesta situação de percurso numa estrada de rugosidade média, apesar do volume de óleo inserido ser praticamente igual àquele observado no caso de uma estrada boa, o volume que se poderia inserir era menor.

Por outro lado, o tempo necessário para se inserir 0,58 l de óleo é de 539 segundos, valor menor que o verificado no caso anterior. A razão pela qual acontece esta diminuição de tempo está relacionada com o maior volume de óleo inserido por segundo nesta situação.

Por último, temos a análise aos valores alcançados quando o veículo circula em uma estrada pobre, onde a rugosidade é mais elevada. Na Figura 5.10 está apresentada a evolução da pressão no interior do acumulador. Poder-se-á ver que a pressão inicial no interior do acumulador é de 74,6 bar, tendo esta aumentado até 82,2 bar, em apenas 15 segundos.



Figura 5.10 Evolução da pressão em uma estrada pobre

O volume de óleo inserido nesta situação é apresentado na Figura 5.11

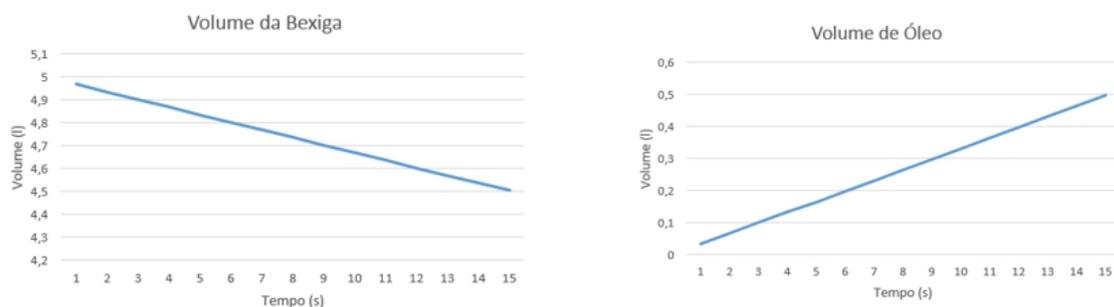


Figura 5.11 Volume da bexiga e de óleo no acumulador

Relativamente ao volume de óleo verifica-se que apenas 0,5 l do volume foi ocupado. No entanto, apenas 3 l de volume do acumulador se poderia encher, pelo facto das pressões neste caso terem sido aumentadas. O tempo de enchimento foi de 15 segundos. Comparando com as situações de

uma estrada boa e de uma estrada média este tempo é muito menor. Assim poder-se-á encher o acumulador mais do que uma vez.

Relativamente à situação de descarga do acumulador, para as três situações anteriormente apresentadas, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 Valores obtidos da descarga do acumulador

Pressão Mínima de descarga arbitrada (Pmin) [bar]	Binário [N.m]	Caudal de descarga [l/min]	Tempo de Esvaziamento [s]	Potência [kW]	Energia Gerada [kJ]
1	0,56	10	2,99	0,17	0,51
5	22,11		3,50	0,68	2,38
10	37,21		2,98	1,14	3,41

Para os tempos de esvaziamento da Tabela 11 os valores da energia gerada são para uma estrada boa 0,51 kJ, para uma estrada média 2,38 kJ e por último, para estrada pobre 3,41 kJ. Contudo, verificou-se que os tempos de enchimento para um acumulador de 5l mais o tempo que demora a esvaziar-se o acumulador, não chegam à totalidade do tempo percorrido para a distância estipulada. Posto isto, podemos concluir que é possível encher mais do que um acumulador durante o tempo em que o veículo percorre 100 km, deste modo num percurso bom pode-se encher 5 acumuladores, numa estada média pode-se acumular 8 depósitos e para uma estrada pobre pode-se encher 500 depósitos. Então, percorrendo esta distância em 3000 segundos para uma estrada boa obter-se-iam 2,7 kJ. Numa estrada média, que demorava 4500 segundos a ser percorrida obter-se-iam 19,75 kJ e para uma estrada pobre percorrida num tempo de 9000 segundos a energia obtida seria de 1707,11 kJ.

Tabela 12 Balanço energético

Acumulador (5 l)						
Gasóleo			Gasolina			
Energia [MJ]	Energia Gasóleo [MJ]	Energia Gasóleo c/ηe [MJ]	%	Energia Gasolina [MJ]	Energia Gasolina c/ηe [MJ]	%
0,0027			0,002			0,004
0,02	253,09	101,24	0,02	224,28	67,28	0,03
1,71			1,6			2,5

Podemos dizer sobre o balanço energético, o valor mais relevante é em relação à gasolina, sendo 2,5 % da energia recuperada pelo acumulador. Estando este valor relacionado com o tipo de estrada e com a energia da gasolina.

5.10.2 Resultados para acumulador de 10 litros

Através da alteração do acumulador, passou-se a ter uma capacidade volumétrica de 10 l. Tentou perceber-se se haveria alterações significativas comparativamente a um acumulador de 5 l. Este novo dado foi submetido às mesmas condições mencionadas na secção 5.10.1. Na Tabela 13 encontram-se os valores obtidos das iterações efetuadas e que estão no Anexo E.

Tabela 13 Resultados para o enchimento do acumulador 10 l

Tipo de Estrada	Pressão de enchimento do Gás (p_0) [bar]	Quantidade de óleo teórica	Volume de óleo inserida no acumulador [l]	Tempo de Enchimento [s]	Pressão acumulada [bar]
Boa	10,59	8,00	1,00	1128	11,76
Média	42,35	7,50	1,17	1077	47,94
Fraca	74,11	6,00	0,99	30	82,28

Numa estrada boa obteve-se uma evolução da pressão apresentada na Figura 5.12.

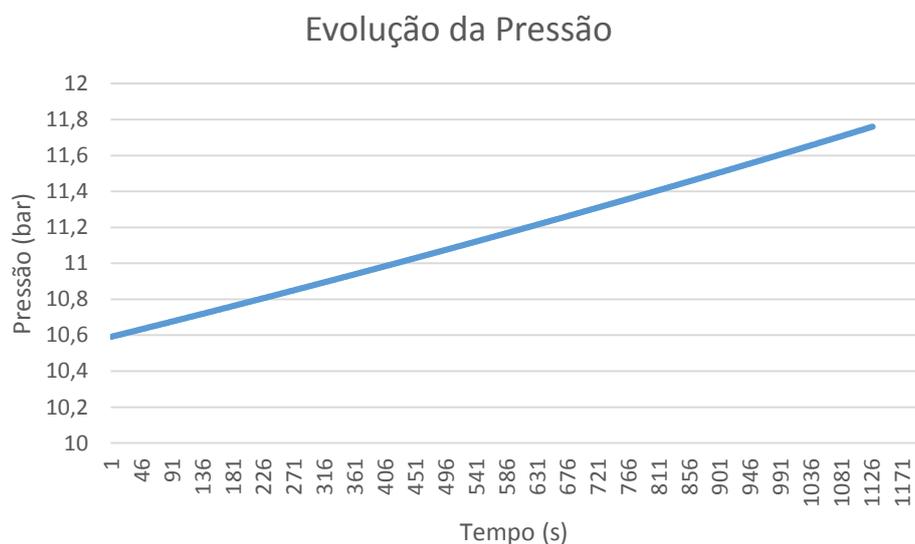


Figura 5.12 Evolução da pressão em uma estrada boa

Da análise à evolução da pressão constata-se que este valor atinge uma pressão máxima de 11,76 bar a partir de uma pressão inicial de 10,59 bar. Esta evolução ocorre num espaço de

tempo de 1128 segundos. Comparando estes valores com os obtidos para um acumulador de 5l, verifica-se que a única diferença está no tempo de enchimento. Neste caso, o tempo de enchimento passa para quase o dobro, pois no acumulador de 5 l o tempo obtido foi de 564 segundos.

Relativamente ao comportamento do volume da bexiga e de óleo inserido no acumulador, poder-se-á analisar os resultados expressos na Figura 5.13.

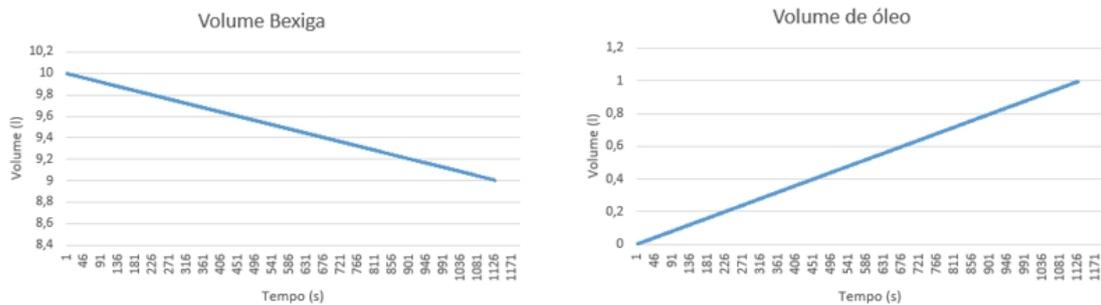


Figura 5.13 Volume da bexiga e de óleo no acumulador

Do volume da bexiga e de óleo inserido no acumulador verificou-se a introdução no acumulador de 1 l de óleo, ou seja, mais 0,5l quando comparado com o valor para o acumulador de 5 l.

Quanto o veículo circula numa estrada média pode ver-se através da Figura 5.14 a evolução que a pressão adquire no interior do acumulador.

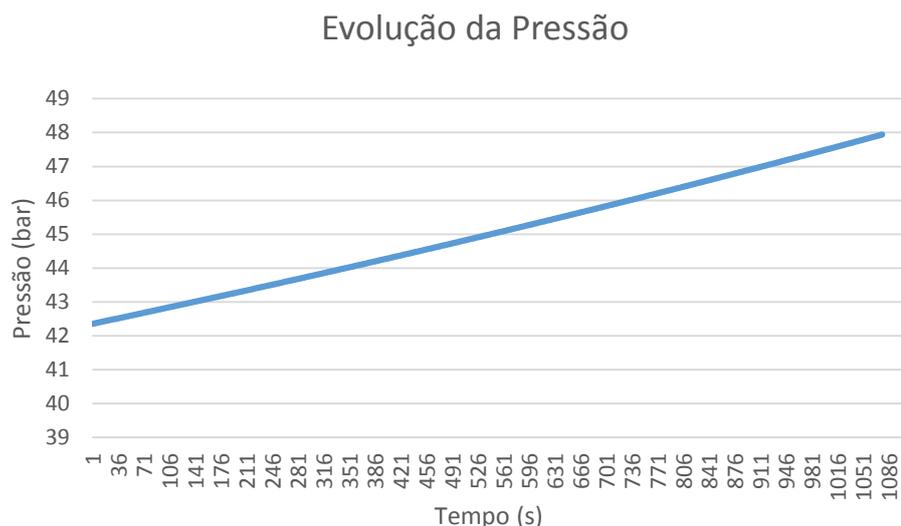


Figura 5.14 Evolução da pressão em uma estrada média

Na análise à evolução da pressão verifica-se que esta aumenta de 42,35 bar até um máximo de 47,94 bar. Esta evolução ocorre num tempo de 1077 segundos, que é menor do que o tempo quando o veículo circula numa estrada boa. Na Figura 5.15 são apresentados os valores referentes ao comportamento do volume da bexiga em comparação com o volume de óleo inserido.

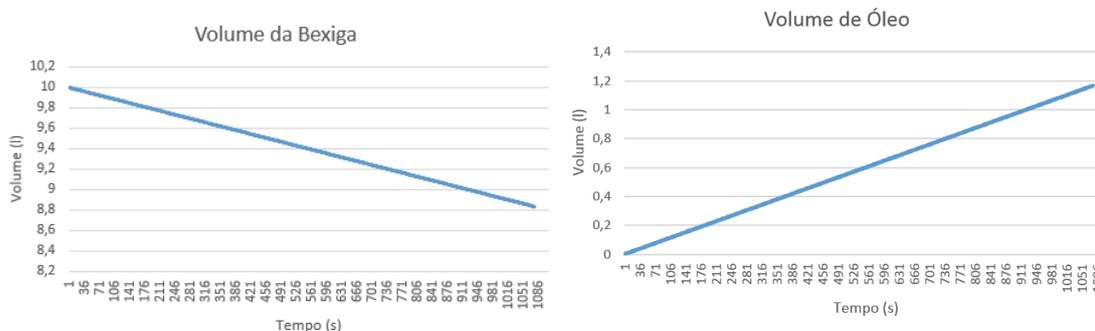


Figura 5.15 Volume da bexiga e de óleo no acumulador

As ilações retiradas a partir da Figura 5.15 indicam que apenas 1,17 l foram inseridos no interior do acumulador. O restante volume que poderia ascender a 7,5 l continua ocupado pelo volume da bexiga.

Quando o veículo circula numa estrada pobre o comportamento da pressão poder-se-á visualizar na Figura 5.16.



Figura 5.16 Evolução da pressão para uma estrada pobre

Da análise à evolução da pressão pode ver-se que esta aumenta relativamente à pressão que as outras estradas proporcionam. De uma pressão inicial de 74,11 bar atingiu-se uma pressão

máxima que de 82,2 bar. Esta pressão é semelhante àquela atingida nas mesmas condições, num acumulador de 5 l. Contudo o tempo que se demorou a atingir 82,2 bar foi de 30 segundos, o dobro do tempo para atingir a mesma pressão num acumulador de 5 l.

Relativamente aos valores do volume atingido poder-se-á verificar através da Figura 5.17

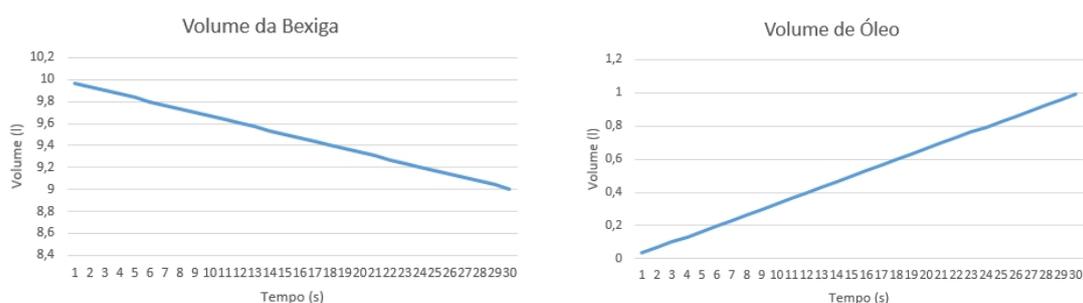


Figura 5.17 Volume da bexiga e de óleo inserido no acumulador

Podemos verificar que o comportamento do volume da bexiga diminui quando é inserido óleo no acumulador. Atingindo-se dentro do acumulador um volume de quase 1 l. O volume que o acumulador poderia alcançar seria no máximo 6 l. O tempo em que o volume de óleo foi inserido no acumulador foi de 30 segundos.

Da descarga do acumulador obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Valores obtidos da descarga do acumulador

Tipo de estrada	Pressão descarga arbitrada (Pmin) [bar]	Binário [N.m]	Caudal de descarga [l/min]	Tempo de Esvaziamento [s]	Potência [kW]	Energia Gerada [kJ]
Boa	1	0,56	10	5,97	0,17	1,02
Média	5	22,11		7,00	0,67	4,75
Pobre	10	37,21		5,96	1,144	6,82

Podemos concluir que do binário produzido nas três estradas, o maior valor é verificado para as condições de estrada pobre. Para um caudal de descarga de 10 l/min, a situação mais demorada acontece para a estrada média, onde o tempo é de 7 segundos. Relativamente ao número de acumuladores que se poderão utilizar podemos dizer que numa estrada boa podemos fazer 3 acumulações, numa média 4 acumulações e numa estrada pobre podem-se fazer 250 acumulações. Quanto à energia produzida, para os tempos de esvaziamento observados na Tabela

14, temos para uma estrada boa 1,02 kJ, para uma estrada média 4,75 kJ e por último, para uma estrada pobre 6,83 kJ.

Contudo, verificou-se que os tempos de enchimento para um acumulador de 10l mais o tempo que demora a esvaziar-se o acumulador, e apesar de serem maiores, não chegam à totalidade do tempo percorrido para a distância estipulada.

Posto isto, podemos concluir que é possível encher mais do que um acumulador durante o tempo em que o veículo percorre 100 km. Então, percorrendo esta distância em 3000 segundos para uma estrada boa obter-se-iam 2,7 kJ. Numa estrada média, que demorava 4500 segundos a ser percorrida obter-se-iam 19,75 kJ e para uma estrada pobre percorrida num tempo de 9000 segundos a energia obtida seria de 1707,11 kJ.

Em termos de balanço energético, os valores alcançados estão presentes na Tabela 15.

**Tabela 15 Balanço energético
Acumulador (10 l)**

Gasóleo			Gasolina			
Energia [MJ]	Energia Gasóleo [MJ]	Energia Gasóleo c/ηe [MJ]	%	Energia Gasolina [MJ]	Energia Gasolina c/ηe [MJ]	%
0,0027			0,002			0,004
0,02	253,09	101,24	0,02	224,28	67,28	0,03
1,71			1,6			2,5

Podemos dizer sobre o balanço energético, o valor mais relevante é em relação à gasolina. Sendo 2,5 % da energia recuperada pelo acumulador. Valor semelhante ao determinado nos cálculos efetuados para o acumulador de 5 l.

6. Capítulo

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão abordadas todas as ilações retiradas pela realização deste trabalho. Far-se-ão sugestões para trabalhos futuros, com o intuito de otimizar o sistema e dar um novo contributo para o estudo de um sistema de recuperação de energia através

6.1 Conclusões

Do trabalho realizado, pode concluir-se que os sistemas regenerativos pertencem a uma realidade já existente. Por outro lado, a energia produzida pelas suspensões tem suscitado o interesse de inúmeros investigadores, de grandes fabricantes de componentes do setor, o qual, tem dado origem a novas empresas.

O amortecedor hidráulico monotubo selecionado para este trabalho foi modificado para que pudesse ser integrado num sistema de recuperação de energia através do amortecimento. Apesar da danificação do amortecedor, aquando realização de testes, podemos considerar que a construção e adaptação do amortecedor foram bem executadas. Uma vez, que as alterações efetuadas permaneceram intactas, pois o componente danificado já fazia parte do cilindro. Contudo, poderia ter havido um reforço de precaução na zona afetada, tornando o amortecedor mais resistente, embora nada fizesse prever tal situação. Outra opção seria a construção de um amortecedor de raiz. Relativamente aos circuitos representativos do movimento do amortecedor elaborados em Automation Studio® e posteriormente replicados na bandada de testes concluiu-se que o princípio de funcionamento ao que representa um amortecedor está presente, contudo apresenta uma limitação devido ao acionamento manual. No que respeita ao circuito regenerativo concluiu-se que o funcionamento e os movimentos do óleo são executados apesar de não ter sido possível retirar dados que comprovem os cálculos executados.

Verificou-se que o tamanho diferente entre acumuladores, ou seja, 5 l e 10 l, influencia o tempo de enchimento e o volume de óleo inserido. Foi notória, a necessidade de uma maior quantidade de golpes sobre o amortecedor para se conseguir encher os acumuladores maiores 10 l. A disponibilidade de utilização num acumulador mais pequeno é mais rápida, embora o tempo de utilização por parte de um acumulador com maior volume seja superior.

Das simulações efetuadas concluiu-se que consoante o tipo de estrada, o binário é modificado. Isto é, para uma estrada pobre e como seria de esperar, o binário aumenta quando

comparado com aquele produzido por uma estrada boa, tendo portanto o binário mais relevante, 37,21 N.m sido verificado para as estradas pobres. A energia produzida neste tipo de estradas é de 1,7 MJ, que representa aproximadamente 1% da energia que um veículo consome, quando o combustível utilizado é o gasóleo. Este valor aumenta para 2,5% quando o combustível utilizado é a gasolina. Estes resultados, quando comparados com aqueles enunciados noutros projetos, são mais baixos, pois os investigadores afirmam que seria possível alcançar os 10% de energia recuperada. No entanto, as condições de simulação aplicadas não descrevem, verdadeiramente, todo o comportamento do veículo em estrada. Pois, neste sistema considera-se apenas um aumento de pressão progressivo, e que na realidade não seria expectável. Desta forma, cada volume de óleo acumulado teria de ser libertado para produzir-se energia, dando lugar a mais óleo inserido.

Em relação aos acumuladores estudados, e relativamente às prestações que cada um obteve, conclui-se que faz mais sentido juntar ao sistema, um acumulador de 5 l. Este tem os mesmos desempenhos que o acumulador de 10 l e a vantagem de ser menos pesado para o veículo.

Assim, temos que o fator diferenciador deste sistema, relativamente aos já existentes, reside no facto de ser um amortecedor monotubo convencional adaptado.

A investigação sobre sistemas regenerativos é uma realidade recente, mas bastante promissora, e espera-se que o trabalho desenvolvido durante este projeto tenha sido um bom contributo para esta área e, conseqüentemente, para o desenvolvimento de mais e melhores alternativas à dependência das energias não renováveis.

6.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugerem-se como propostas de trabalho as seguintes sugestões. Como o amortecedor adaptado ficou praticamente inutilizado sugere-se que se modifique um novo obedecendo aos mesmos princípios do amortecedor já modificado. Adquirir um acumulador novo para integrar o circuito regenerativo de modo a que seja possível retirar dados experimentais sendo desta forma possível analisar, validar e quantificar a capacidade de acumulação. Automatizar o sistema de controlo das válvulas que fazem a passagem do óleo para o circuito regenerativo.

Referências

- [1] P. S. Zhang, "Design of Electromagnetic Shock Absorbers for Energy Harvesting from Vehicle Suspension," Stony Brook University, Dezembro 2010.
- [2] marcusfitzhugh, 3 mar 2012. [Online]. Available: <http://www.marcusfitzhugh.com/CLK/W208-2.html>.
- [3] J. Dixon, Tires, Suspension and Handling, EUA: SAE, 1996.
- [4] 10 Outubro 2013. [Online]. Available: http://www.tenneco.com/original_equipment/ride_control/products_and_technologies/.
- [5] [Online]. Available: <http://eblog.mercedes-benz-passion.com/2012/04/the-new-mercedes-benz-sl-chassis-and-suspension-best-contact-with-the-road/>.
- [6] Audi, Pneumatic Suspension System Part 1 Selflevelling Suspension in the Audi A6 Design dan Function, Audi.
- [7] CEPRA, Órgãos da Suspensão e seu Funcionamento, CEPRA.
- [8] J. Dixon, The Shock Absorber Handbook, EUA: SAE.
- [9] Koni, 25 Julho 2013. [Online]. Available: http://www.koni.com/fileadmin/user_upload/global/Website%20material/Technology/Bi_Tube/Image_poster_eng_ger.png.
- [10] 12 Outubro 2013. [Online]. Available: <http://www.koni.com>.
- [11] A. S. Miranda, Apontamentos de Órgãos de Máquinas I, Guimarães: Universidade do Minho.
- [12] elo-sa, 3 Maio 2013. [Online]. Available: <http://www.elo-sa.pt/>.
- [13] eatondetroitsspring, [Online]. Available: <http://www.eatondetroitsspring.com/>.
- [14] J. A. Almacinha, "Motor do Tipo Orbital Utilizado em Transmissões Hidrostáticas," Faculdade de Engenharia do Porto, Porto.
- [15] Rotary Power, Hydraulic Pumps & Motors, Rotary Power.
- [16] E. Seabra, Sebenta de Automação Industrial I.

- [17] 2 setembro 2013. [Online]. Available: <http://www.cilgastech.com.br/acumulador-bexiga.php>.
- [18] 3 setembro 2013. [Online]. Available: <http://www.cilgastech.com.br/acumulador-membrana.php>.
- [19] R. Fodor, *The Variable Linear Transmission for Regenerative Damping in Vehicle Suspension Control*, Vehicle System Dynamics, 1993.
- [20] James A. Stansbury, 'Regenerative Suspension with Accumulator System and Methods', Patentdocs,.
- [21] www.greencarcongress.com, 4 Maio 2013. [Online]. Available: www.greencarcongress.com/2009/02/mit-students-de.html.
- [22] S. N. Avadhany, "Analysis of hydraulic Power Transduction in Regenerative Rotary shock Absorbers as Function of Working Fluid Kinematic Viscosity," 2009.
- [23] wired, "Wired," [Online]. Available: <http://www.wired.com/autopia/tag/genshock/>.
- [24] H. a. S. Okada, "Active and Regenerative Control of an Electrodynamic- Type suspension," *JSME International Journal*, 1997.
- [25] S. a. N. Nakano, "Self-Powered Active Vibration Control Using a Single Electric Actuator," *Journal of sound and vibration*, pp. 213-235, 2003.
- [26] L. Zou, Scully, Shestani e a. Zhou, "Design and Characterization of an Electromagnetic Energy Harvester for Vehicle Suspensions," *Smart Material and Struture*, 2010.
- [27] Suda, Y. a. Shiiba e Taichi, *A New Hybrid Suspension System whith Active Control and Energy Regeneration*, Vehicle System Dynamics.
- [28] K. Nakano, "Combined Type Self-Powered Active Vibration Control of Truck Cabins".
- [29] H. Gonçalves, "Análises de Vibrações de Sistemas Integrados para Veículos Elétricos," Universidade do Minho, Guimarães, 2012.
- [30] KYB, 4 Março 2013. [Online]. Available: <http://www.kyb-europe.com/>.
- [31] A. Silva, C. T. Ribeiro, J. Dias e L. Sousa, *Desenho Técnico Moderno*, LIDEL, 2004.
- [32] G. Cudell, *Óleo-Hidráulica, Automação Industrial*, Gustavo Cudell, 2008.
- [33] T. Gillespie, "Fundamentals of Vechicle Dynamiscs," Warrendale, SAE, 1992.

- [34] C. J. Dodds e J. D. Robson, "The description of Road Surface Roughness," *Journal of Sound Vibration*, p. 31, 1973.
- [35] E. Rosa, Curso de Dinâmica Veicular, Fiat R&V UFSC, 2001.
- [36] J. Martins, Motores de Combustão Interna, Publindústria, 2006.
- [37] 12 outubro 2013. [Online]. Available: <http://www.koni.com/>.
- [38] R. Power, Hydraulic Pumps & Motors, Rotary Power.

Anexos

Anexo A – Catálogo Gustavo Cudell (Componentes Hidráulicos)

Na figura, retirada do catálogo do Gustavo Cudell, de 2008, está o racor utilizado nas ligações efetuadas no trabalho. O racor selecionado é da série 2500, e a descrição 2520 – 1/4”.

TEMA® Acoplamentos Rápidos - Dados Técnicos: Pág. 43

Código	Descrição	Preço Unit.
109850	Parte Fêmea TEMA 2310-1/8"	16,09 €
102273	Parte Fêmea TEMA 2510-1/4"	20,41 €
102272	Parte Fêmea TEMA 3810-3/8"	30,47 €
102274	Parte Fêmea TEMA 5010-1/2"	32,62 €
102275	Parte Fêmea TEMA 7510-3/4"	50,92 €
102276	Parte Fêmea TEMA 10010-1"	79,99 €
109851	Parte Macho TEMA 2320-1/8"	9,13 €
102277	Parte Macho TEMA 2520-1/4"	10,86 €
102278	Parte Macho TEMA 3820-3/8"	13,21 €
102279	Parte Macho TEMA 5020-1/2"	15,39 €
102280	Parte Macho TEMA 7520-3/4"	22,28 €
102281	Parte Macho TEMA 10020-1"	35,77 €
111239	Parte Macho TEMA 3820-V	16,02 €
103788	Acoplamento Completo 15000-1.1/2"	468,40 €
115289	Protecção de Poeira Fêmea 2315 1/8"	2,33 €
102282	Protecção de Poeira Fêmea 2516 1/4"	2,45 €
102284	Protecção de Poeira Fêmea 3816 3/8"	2,77 €
102286	Protecção de Poeira Fêmea T 5016 1/2"	2,93 €
102288	Protecção de Poeira Fêmea 7516 3/4"	3,12 €

Série 2300
Série 2500
Série 3800
Série 5000

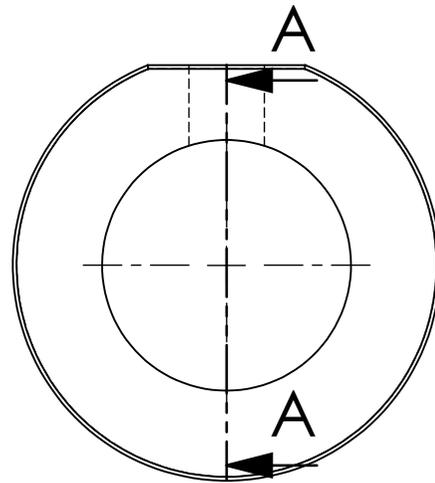
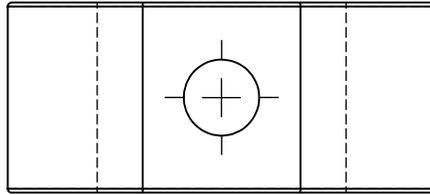
Os acumuladores selecionados para o trabalho foram selecionados das opções existentes no catálogo do Gustavo Cudell. Foram selecionados dois acumuladores de 5 e 10 (l).

epoll ACUMULADORES ☎ Consulte Preços página: 91

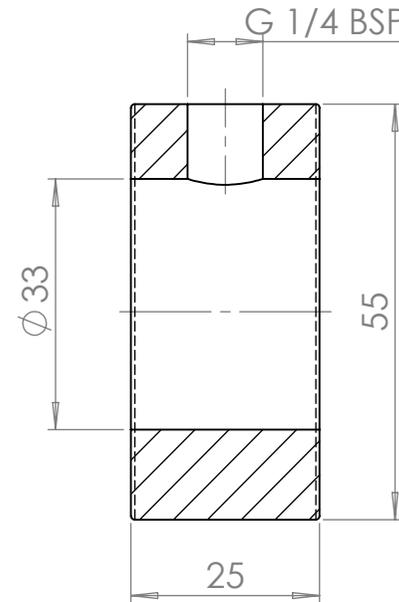
Acumuladores de Bexiga
Bexigas e vedantes em NBR • Temperaturas de trabalho de -40° a +80° C

Tipo	Capacidade Volumétrica (l)	Ligação	Pressão Máxima (bar)
AS 0,2	0,2	1/2"	330
AS 0,7	0,7	3/4"	
AS 1	1		
AS 3	3		
AS 5	5	1.1/4"	
AS 10	10	2"	
AS 15	15		
AS 20	20		

Anexo B – Desenhos Técnicos



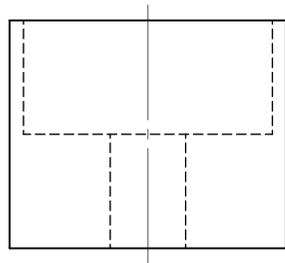
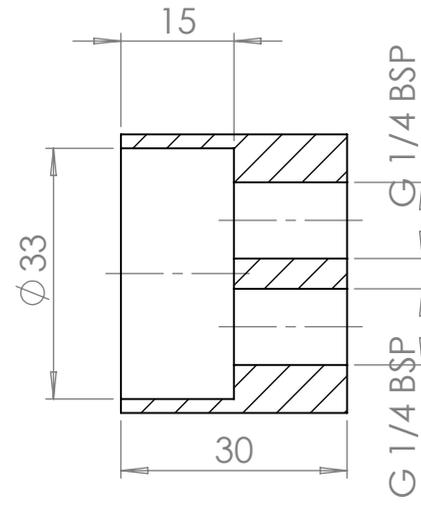
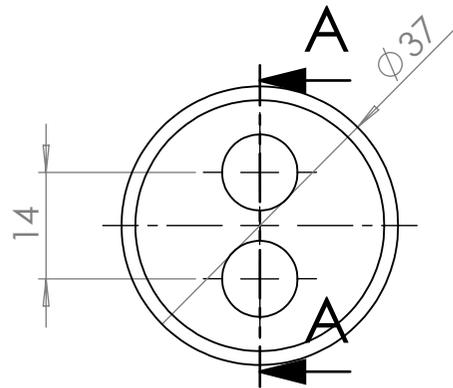
SECTION A-A
SCALE 1 : 1



Projec.		Universidade do Minho Departamento de Eng. Mecânica	
Desenh.			
Copiou			
Verific.			João Ferreira N°46989
Escala	1:2	Suporte Superior	
			Substitui:
			Substitui por:

SECTION A-A

SCALE 1 : 1



Projec.		Universidade do Minho Departamento de Eng. Mecânica						
Desenh.								
Copiou								
Verific.			João Ferreira N°46989					
Escala	1:2	Suporte Inferior						
			Substitui:					
			Substitui por:					

Anexo C – Anilhas

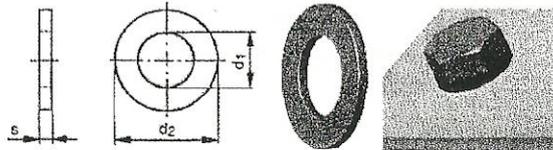
Neste anexo está a lista de anilhas existentes, retirada do livro de Desenho Técnico Moderno. Sendo a dimensão de anilha selecionada M16

Anexo B – Tabelas de Elementos de Máquinas

B.7 ANILHAS

Designação: Anilha Plana-Md

Normas: ISO 7089 DIN 125-1 A Em Aço



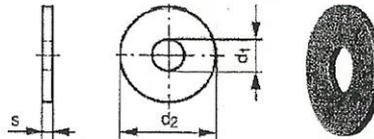
D	M1,6	M2	M2,5	M2,6	M3	M3,5	M4	M5	M6	M7	M8	M10
d1	1,7	2,2	2,7	2,8	3,2	3,7	4,3	5,3	6,4	7,4	8,4	10,5
d2	4	5	6	7	7	8	9	10	12	14	16	20
s	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	1	1,6	1,6	1,6	2

D	M11	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39
d1	12	13	15	17	19	21	23	25	28	31	34	37	40
d2	24	24	28	30	34	37	39	44	50	56	60	66	72
s	2,5	2,5	2,5	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6

D	M42	M45	M48	M52	M56	M60	M64
d1	43	46	50	54	58	62	66
d2	78	85	92	98	105	110	115
s	7	7	8	8	9	9	9

Designação: Anilha Plana-Md

Normas: ISO 7093 DIN 9021 Em Aço



D	M3	M3,5	M4	M5	M6	M7	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
d1	3,2	3,7	4,3	5,3	6,4	7,4	8,4	10,5	13	15	17	20	22
d2	9	11	12	15	18	22	24	30	37	44	50	56	60
s	0,8	0,8	1	1,2	1,6	2	2	2,5	3	3	3	4	4

Exemplo de designação: Anilha Plana - ISO 7093 – M12

Anexo D – Resultados Numéricos do Acumulador de 5 l

No anexo de resultados numéricos do acumulador de 5 (l) estão as iterações resultantes do cálculo efetuado no *Excel*. Das iterações efetuadas deram origem os gráficos da evolução da pressão, do volume de óleo e do volume da bexiga.

As iterações apresentadas estão separadas de 10 em 10 segundos.

Para uma estrada boa temos as seguintes

Para uma estrada média temos as seguintes

Segundos	Pressão	Vbexiga	Vóleo
1	10,59187	4,999118	0,000882
10	10,60872	4,991175	0,008825
20	10,62752	4,98235	0,01765
30	10,64637	4,973525	0,026475
40	10,6653	4,9647	0,0353
50	10,68429	4,955875	0,044125
59	10,70144	4,947933	0,052067
60	10,70335	4,94705	0,05295
70	10,72248	4,938225	0,061775
80	10,74167	4,9294	0,0706
90	10,76094	4,920575	0,079425
100	10,78027	4,91175	0,08825
110	10,79968	4,902925	0,097075
120	10,81915	4,8941	0,1059
130	10,83869	4,885275	0,114725
140	10,85831	4,87645	0,12355
150	10,87799	4,867625	0,132375
160	10,89775	4,8588	0,1412
170	10,91758	4,849975	0,150025
180	10,93748	4,84115	0,15885
190	10,95746	4,832325	0,167675
210	10,99763	4,814675	0,185325
220	11,01782	4,80585	0,19415
230	11,03809	4,797025	0,202975
240	11,05844	4,7882	0,2118
250	11,07885	4,779375	0,220625
260	11,09935	4,77055	0,22945
270	11,11992	4,761725	0,238275
280	11,14057	4,7529	0,2471
290	11,16129	4,744075	0,255925
300	11,18209	4,73525	0,26475
310	11,20297	4,726425	0,273575
320	11,22393	4,7176	0,2824
330	11,24496	4,708775	0,291225
340	11,26608	4,69995	0,30005
350	11,28727	4,691125	0,308875
360	11,30854	4,6823	0,3177

Segundos	Pressão	Vbexiga	Vóleo
1	42,35918	4,998917	0,001083
10	42,44193	4,989169	0,010831
20	42,53427	4,978339	0,021661
30	42,62701	4,967508	0,032492
40	42,72015	4,956677	0,043323
50	42,8137	4,945847	0,054153
59	42,89825	4,936099	0,063901
60	42,90766	4,935016	0,064984
70	43,00204	4,924185	0,075815
80	43,09683	4,913355	0,086645
90	43,19204	4,902524	0,097476
100	43,28767	4,891693	0,108307
110	43,38373	4,880863	0,119137
120	43,48021	4,870032	0,129968
130	43,57712	4,859201	0,140799
140	43,67447	4,848371	0,151629
150	43,77225	4,83754	0,16246
160	43,87047	4,826709	0,173291
170	43,96913	4,815879	0,184121
180	44,06824	4,805048	0,194952
190	44,16779	4,794217	0,205783
210	44,36826	4,772556	0,227444
220	44,46918	4,761725	0,238275
230	44,57055	4,750894	0,249106
240	44,67239	4,740064	0,259936
250	44,7747	4,729233	0,270767
260	44,87748	4,718402	0,281598
270	44,98073	4,707572	0,292428
280	45,08445	4,696741	0,303259
290	45,18866	4,68591	0,31409
300	45,29335	4,67508	0,32492
310	45,39852	4,664249	0,335751
320	45,50418	4,653418	0,346582
330	45,61034	4,642588	0,357412
340	45,71699	4,631757	0,368243
350	45,82415	4,620926	0,379074
360	45,9318	4,610096	0,389904

370	11,3299	4,673475	0,326525	370	46,03997	4,599265	0,400735
390	11,37285	4,655825	0,344175	390	46,25783	4,577604	0,422396
400	11,39445	4,647	0,353	400	46,36753	4,566773	0,433227
410	11,41613	4,638175	0,361825	410	46,47776	4,555942	0,444058
420	11,43789	4,62935	0,37065	420	46,58851	4,545112	0,454888
430	11,45974	4,620525	0,379475	430	46,6998	4,534281	0,465719
440	11,48167	4,6117	0,3883	440	46,81161	4,52345	0,47655
450	11,50368	4,602875	0,397125	450	46,92396	4,51262	0,48738
460	11,52578	4,59405	0,40595	460	47,03686	4,501789	0,498211
470	11,54796	4,585225	0,414775	470	47,15029	4,490958	0,509042
480	11,57023	4,5764	0,4236	480	47,26428	4,480128	0,519872
490	11,59258	4,567575	0,432425	490	47,37882	4,469297	0,530703
500	11,61503	4,55875	0,44125	500	47,49391	4,458466	0,541534
510	11,63755	4,549925	0,450075	510	47,60957	4,447636	0,552364
520	11,66017	4,5411	0,4589	520	47,72579	4,436805	0,563195
530	11,68287	4,532275	0,467725	530	47,84257	4,425974	0,574026
539	11,70338	4,524333	0,475667	539	47,94817	4,416227	0,583773
540	11,70567	4,52345	0,47655				
550	11,72855	4,514625	0,485375				
560	11,75152	4,5058	0,4942				
561	11,75382	4,504918	0,495082				
562	11,75612	4,504035	0,495965				
563	11,75843	4,503153	0,496847				
564	11,76073	4,50227	0,49773				

Para uma estrada pobre temos as seguintes iterações, sem existir intervalos.

Segundos	Pressão	Vbexiga	Vóleo
1	74,60402	4,96689	0,03311
2	75,10468	4,933781	0,066219
3	75,61209	4,900671	0,099329
4	76,12642	4,867561	0,132439
5	76,64778	4,834452	0,165548
6	77,17634	4,801342	0,198658
7	77,71223	4,768232	0,231768
8	78,25563	4,735123	0,264877
9	78,80667	4,702013	0,297987
10	79,36553	4,668904	0,331096
11	79,93237	4,635794	0,364206
12	80,50737	4,602684	0,397316
13	81,0907	4,569575	0,430425
14	81,68255	4,536465	0,463535
15	82,28309	4,503355	0,496645

Anexo E – Resultados Numéricos do Acumulador de 10 l

No anexo de resultados numéricos do acumulador de 10 (l) estão presentes todas as iterações resultantes do cálculo efetuado no *Excel*. Das iterações efetuadas deram origem os gráficos da evolução da pressão, do volume de óleo e do volume da bexiga.

Para uma estrada boa temos as iterações:

Segundos	Pressão	Vbexiga	Vóleo
1	10,59093	9,999118	0,000882
20	10,60872	9,98235	0,01765
40	10,62752	9,9647	0,0353
60	10,64637	9,94705	0,05295
80	10,6653	9,9294	0,0706
100	10,68429	9,91175	0,08825
120	10,70335	9,8941	0,1059
140	10,72248	9,87645	0,12355
160	10,74167	9,8588	0,1412
180	10,76094	9,84115	0,15885
200	10,78027	9,8235	0,1765
220	10,79968	9,80585	0,19415
240	10,81915	9,7882	0,2118
260	10,83869	9,77055	0,22945
280	10,85831	9,7529	0,2471
300	10,87799	9,73525	0,26475
320	10,89775	9,7176	0,2824
340	10,91758	9,69995	0,30005
360	10,93748	9,6823	0,3177
380	10,95746	9,66465	0,33535
400	10,97751	9,647	0,353
420	10,99763	9,62935	0,37065
440	11,01782	9,6117	0,3883
460	11,03809	9,59405	0,40595
480	11,05844	9,5764	0,4236
500	11,07885	9,55875	0,44125
520	11,09935	9,5411	0,4589
540	11,11992	9,52345	0,47655
560	11,14057	9,5058	0,4942
580	11,16129	9,48815	0,51185
600	11,18209	9,4705	0,5295
620	11,20297	9,45285	0,54715
640	11,22393	9,4352	0,5648
660	11,24496	9,41755	0,58245
680	11,26608	9,3999	0,6001
700	11,28727	9,38225	0,61775
720	11,30854	9,3646	0,6354
740	11,3299	9,34695	0,65305

Para uma estrada média temos as iterações

Segundos	Pressão	Vbexiga	Vóleo
1	42,35459	9,998917	0,001083
20	42,44193	9,978339	0,021661
40	42,53427	9,956677	0,043323
60	42,62701	9,935016	0,064984
80	42,72015	9,913355	0,086645
100	42,8137	9,891693	0,108307
120	42,90766	9,870032	0,129968
140	43,00204	9,848371	0,151629
160	43,09683	9,826709	0,173291
180	43,19204	9,805048	0,194952
200	43,28767	9,783386	0,216614
220	43,38373	9,761725	0,238275
240	43,48021	9,740064	0,259936
260	43,57712	9,718402	0,281598
280	43,67447	9,696741	0,303259
300	43,77225	9,67508	0,32492
320	43,87047	9,653418	0,346582
340	43,96913	9,631757	0,368243
360	44,06824	9,610096	0,389904
380	44,16779	9,588434	0,411566
400	44,2678	9,566773	0,433227
420	44,36826	9,545112	0,454888
440	44,46918	9,52345	0,47655
460	44,57055	9,501789	0,498211
480	44,67239	9,480128	0,519872
500	44,7747	9,458466	0,541534
520	44,87748	9,436805	0,563195
540	44,98073	9,415144	0,584856
560	45,08445	9,393482	0,606518
580	45,18866	9,371821	0,628179
600	45,29335	9,350159	0,649841
620	45,39852	9,328498	0,671502
640	45,50418	9,306837	0,693163
660	45,61034	9,285175	0,714825
680	45,71699	9,263514	0,736486
700	45,82415	9,241853	0,758147
720	45,9318	9,220191	0,779809
740	46,03997	9,19853	0,80147

760	11,35133	9,3293	0,6707
780	11,37285	9,31165	0,68835
800	11,39445	9,294	0,706
820	11,41613	9,27635	0,72365
840	11,43789	9,2587	0,7413
860	11,45974	9,24105	0,75895
880	11,48167	9,2234	0,7766
900	11,50368	9,20575	0,79425
920	11,52578	9,1881	0,8119
940	11,54796	9,17045	0,82955
960	11,57023	9,1528	0,8472
980	11,59258	9,13515	0,86485
1000	11,61503	9,1175	0,8825
1020	11,63755	9,09985	0,90015
1040	11,66017	9,082201	0,917799
1060	11,68287	9,064551	0,935449
1077	11,70224	9,049548	0,950452
1080	11,70567	9,046901	0,953099
1100	11,72855	9,029251	0,970749
1120	11,75152	9,011601	0,988399
1128	11,76073	9,004541	0,995459

760	46,14864	9,176869	0,823131
780	46,25783	9,155207	0,844793
800	46,36753	9,133546	0,866454
820	46,47776	9,111885	0,888115
840	46,58851	9,090223	0,909777
860	46,6998	9,068562	0,931438
880	46,81161	9,046901	0,953099
900	46,92396	9,025239	0,974761
920	47,03686	9,003578	0,996422
940	47,15029	8,981916	1,018084
960	47,26428	8,960255	1,039745
980	47,37882	8,938594	1,061406
1000	47,49391	8,916932	1,083068
1020	47,60957	8,895271	1,104729
1040	47,72579	8,87361	1,12639
1060	47,84257	8,851948	1,148052
1077	47,9423	8,833536	1,166464

Para uma estrada pobre tem-se as iterações efetuadas sem intervalos:

Segundos	Pressão	Vbexiga	Vóleo
1	74,35619	9,96689	0,03311
2	74,60402	9,933781	0,066219
3	74,85351	9,900671	0,099329
4	75,10468	9,867561	0,132439
5	75,35753	9,834452	0,165548
6	75,61209	9,801342	0,198658
7	75,86838	9,768232	0,231768
8	76,12642	9,735123	0,264877
9	76,38621	9,702013	0,297987
10	76,64778	9,668904	0,331096
11	76,91115	9,635794	0,364206
12	77,17634	9,602684	0,397316
13	77,44336	9,569575	0,430425
14	77,71223	9,536465	0,463535
15	77,98298	9,503355	0,496645
16	78,25563	9,470246	0,529754
17	78,53018	9,437136	0,562864
18	78,80667	9,404026	0,595974
19	79,08511	9,370917	0,629083
20	79,36553	9,337807	0,662193
21	79,64794	9,304697	0,695303

22	79,93237	9,271588	0,728412
23	80,21884	9,238478	0,761522
24	80,50737	9,205368	0,794632
25	80,79798	9,172259	0,827741
26	81,0907	9,139149	0,860851
27	81,38555	9,106039	0,893961
28	81,68255	9,07293	0,92707
29	81,98172	9,03982	0,96018
30	82,28309	9,006711	0,993289