

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL – ULBRA

PRÓ-REITORIA ACADÊMICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA AUTOMOTIVA



**MEDIÇÃO DE COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO DE
AMORTECEDORES DE AUTOMÓVEIS E MOTOCICLETAS**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC

JACK SUSLIK POGORELSKY JUNIOR

Canoas, junho de 2005

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL – ULBRA
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA AUTOMOTIVA

**MEDIÇÃO DE COEFICIENTES DE AMORTECIMENTO DE
AMORTECEDORES DE AUTOMÓVEIS E MOTOCICLETAS**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica Automotiva da
Universidade Luterana do Brasil para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico Automotivo

JACK SUSLIK POGORELSKY JUNIOR

992100391-7

Orientador: Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Coordenador: Dr. Gilnei Ocácia

Canoas, junho de 2005

Nome: **Jack Suslik Pogorelsky Junior**

Matrícula: **992100391-7**

BANCA EXAMINADORA

Dr. Gilnei Ocácia

Dr. Luís Carlos Gertz

Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em: **01/06/2005**

Dedico este trabalho a minha mãe

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Rafael Antônio Comparsi Laranja pela disponibilidade, sugestões e orientações fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Gilnei Ocácia e Luís Carlos Gertz agradeço por suas contribuições e correções.

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um equipamento para medição do coeficiente de amortecimento de amortecedores de automóveis e motocicletas.

O trabalho inicia apresentando conceitos fundamentais que serão utilizados para o seu desenvolvimento.

A realização do projeto partiu da definição do equipamento e de suas necessidades. Após foram analisadas algumas formas possíveis para sua realização, apresentando o método matemático.

O dimensionamento dos componentes foi feito considerando não apenas o aspecto matemático, mas também a versatilidade que o equipamento deveria possuir para permitir o uso de diversos amortecedores.

Embora a dificuldade de obtenção de dados sobre amortecedores por parte de seus fabricantes, para comparações, o resultado obtido é confiável, uma vez que os dados utilizados possuem incertezas relativamente pequenas ou corrigidas por dados experimentais.

ABSTRACT

This work consists of the development of an equipment for measurement of the coefficient of damping of shock absorbers of automobiles and motorcycles.

The work initiates presenting basic concepts that will be used for its development.

The accomplishment of the project started for the definition of the equipment and its necessities. After some possible forms for its accomplishment had been analyzed, presenting the mathematical method.

The sizing of the components was made considering the mathematical aspect and the versatility of the equipment, allowing the use of many shock absorbers.

It is not possible to compare the result gotten with data of the manufacturers. The gotten result is trustworthy because the used data possess relatively small uncertainties.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Justificativa.....	2
2. Conceitos Básicos.....	3
2.1. Vibrações Mecânicas.....	3
2.2. Amortecedores.....	8
2.3. Molas.....	8
2.4. Acelerômetros.....	9
3. Método.....	10
3.1. Definição do Equipamento e Suas Necessidades.....	10
3.2. Estudo de Diferentes Formas de Desenvolvimento do Projeto.....	10
3.3. Método para Obtenção do Coeficiente de Amortecimento do Amortecedor.....	11
3.4. Dimensionamento de Todos os Componentes.....	13
3.4. Montagem.....	20
3.5. Testes.....	21
4. Cálculos.....	23
5. Resultados.....	25
6. Conclusões.....	26
Referências Bibliográficas.....	28
Anexo A.....	29
Anexo B.....	31
Anexo C.....	48
Anexo D.....	52
Anexo E.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – esquema básico do sistema.....	1
Figura 2 – sistema sub-amortecido [WOLTER, 1998].....	6
Figura 3 – sistema criticamente amortecido [WOLTER, 1998].....	7
Figura 4 – sistema super-amortecido [WOLTER, 1998]	8
Figura 5 – amortecedor hidráulico [WEBMOTORS, 2005]	8
Figura 6 – primeira possibilidade de desenvolvimento do equipamento	10
Figura 7 – segunda possibilidade de desenvolvimento do equipamento.....	11
Figura 8 – modelo utilizado para o equipamento	11
Figura 9 – esquema do equipamento	12
Figura 10 – esquema do equipamento	14
Figura 11 – comportamento do deslocamento na linha de ação da massa com a variação da massa.....	16
Figura 12 – comportamento do deslocamento na linha de ação da massa com a variação da posição da mola	17
Figura 13 – suporte em “L”	17
Figura 14 – braço oscilante.....	18
Figura 15 – equipamento montado	21
Figura 16 – curva senoidal amortecida para o amortecedor testado.....	22
Figura 17 – esquema do equipamento ajustado para o amortecedor testado.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – características do Aço SAE 1010. [MASUERO, 1997]	14
Tabela 2 – tabela com a variação da massa	16
Tabela 3 – tabela com a variação da posição da mola.....	16
Tabela 4 – tabela de partes do suporte em “L”	18
Tabela 5 – tabela de partes do braço oscilante.	19
Tabela 6 – tabela de partes do sistema de fixação do amortecedor.....	19
Tabela 7 – características das molas 1, 2, 3 e 4	20
Tabela 8 – tabela de partes do sistema de fixação da mola.	20

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

δ - decremento logarítmico, *adimensional*

ζ - índice de amortecimento, *adimensional*

ω_n - frequência natural, em *rad/s*

Φ - ângulo formado pelo braço oscilante o suporte em “L”, em *radianos*

c - coeficiente de amortecimento do amortecedor, em *N.s/m*

c_{cr} - coeficiente de amortecimento crítico, em *N.s/m*

d - distância do amortecedor até a origem do sistema, em *m*

D - distância da mola até a origem do sistema, em *m*

F - força aplicada na mola, em *N*

F_1 - força atuante na linha de ação da massa, em *N*

F_2 a força atuante na linha de ação do amortecedor, em *N*

k - constante de elasticidade da mola, em *N/m*

k_{eq} - constante de elasticidade da mola equivalente na linha de ação da massa, em
N/m

L - distância da massa até a origem do sistema, em *m*

m - massa adicionada ao sistema, em *kg*

m_B - massa do braço oscilante, em kg

MPa – unidade de tensão mega Pascal

n - número de picos, *adimensional*

SAE – Society of Automotive Engineers

x' - deformação da mola, em m

x'' - deslocamento na linha de ação da massa, em m

X_0 - amplitude do primeiro pico analisado, em m/s^2

X_n - amplitude do último pico analisado, em m/s^2

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho trata do desenvolvimento de um equipamento para medição do coeficiente de amortecimento de amortecedores de automóveis e motocicletas.

Como o equipamento deve permitir a obtenção do coeficiente de amortecimento de diversos amortecedores o dimensionamento do equipamento prevê a facilidade de ajuste e troca entre alguns de seus componentes.

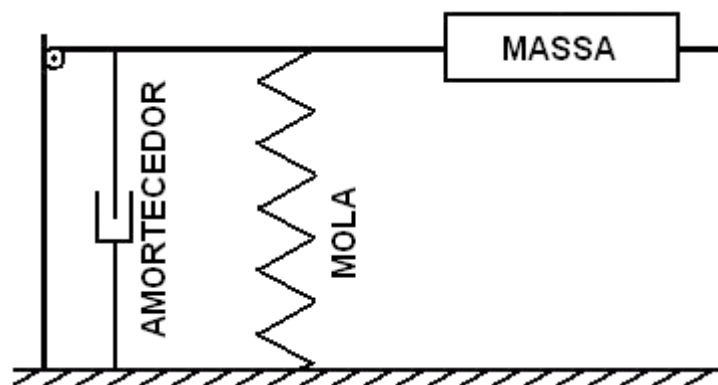


Figura 1 – esquema básico do sistema

A realização do projeto parte da análise das formas possíveis para sua realização, apresentando um método matemático.

Um exemplo de obtenção do coeficiente de amortecimento é apresentado.

Por exemplo, considera-se um sistema constituído por um amortecedor, uma mola e uma massa conforme Figura 1. O dimensionamento e a disposição dos componentes são estudadas para permitir a medição do coeficiente de amortecimento e a versatilidade do equipamento.

Devido a dificuldade de obtenção de dados sobre amortecedores por parte dos fabricantes, para comparações dos resultados, o equipamento utiliza dados com

incertezas relativamente pequenas, que garantem um resultado confiável para o coeficiente de amortecimento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

- Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um equipamento que possibilite o cálculo dos coeficientes de amortecimento para amortecedores de automóveis e motocicletas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Obter o coeficiente de amortecimento de um amortecedor de automóvel;
- Desenvolvimento de um equipamento versátil e de fácil utilização;
- Elaboração de um método de cálculo do coeficiente de amortecimento a partir dos dados obtidos através do equipamento.

1.2. Justificativa

A escolha do tema originou-se da falta de informação disponibilizada a respeito dos valores de coeficientes de amortecimento (ou dos valores de índice de amortecimento) pela maioria dos fabricantes. A falta dessas informações motivou o desenvolvimento de um equipamento versátil e de fácil utilização capaz de possibilitar a obtenção dos coeficientes de amortecimento de amortecedores de automóveis e motocicletas. O desenvolvimento do equipamento permitirá também obter os coeficientes de amortecimento em diferentes períodos da vida útil do amortecedor, e não apenas “quando novo” que seria o dado que poderia ser fornecido pelos fabricantes.

2. CONCEITOS BÁSICOS

O equipamento desenvolvido para medição do coeficiente de amortecimentos dos amortecedores utilizará uma mola, um acelerômetro e o amortecedor a ser testado. Alguns conceitos sobre vibrações mecânicas e os componentes do equipamento são importantes para o entendimento e o desenvolvimento do trabalho.

2.1. Vibrações Mecânicas

Uma vibração mecânica é o movimento de um ponto material ou de um corpo que oscila em torno de uma posição de equilíbrio. Uma vibração mecânica é geralmente produzida quando um sistema é deslocado de sua posição de equilíbrio estável. O sistema tende a retornar a esta posição sob a ação de forças restauradoras (ou de forças elásticas, como no caso de uma massa presa a uma mola, ou de forças gravitacionais, como no caso do pêndulo). Mas o sistema geralmente atinge sua posição original com uma certa velocidade que o leva além desta posição. Como o processo pode se repetir, o sistema mantém-se em movimento oscilatório o redor de sua posição de equilíbrio. O intervalo necessário para o sistema completar um ciclo inteiro do movimento é chamado *período* da vibração. O número de ciclos por unidade de tempo define a *frequência* e o máximo deslocamento do sistema de sua posição de equilíbrio é chamado *amplitude* da vibração [BEER, 1994].

2.1.1. Graus de Liberdade

Geralmente, se n números forem necessários para especificar a posição de um sistema mecânico, diz-se que aquele sistema tem n graus de liberdade. Um disco que se move em seu plano, sem vínculo, tem três graus de liberdade: os deslocamentos x e y de seu centro de gravidade e o ângulo de rotação em torno do centro de gravidade. Um cilindro que “rola” para baixo em um plano inclinado tem um grau de liberdade; se, por outro lado, ele desce rolando e deslizando, o número de graus de liberdade passa a ser dois, correspondendo a rotação e à translação [DEN HARTOG, 1986].

2.1.2. Formas de Vibração.

As vibrações podem ser livres sem amortecimento, livres com amortecimento, forçadas sem amortecimento ou forçadas com amortecimento.

Vibrações livres ocorrem quando, depois de uma perturbação inicial, não há mais força externa atuando [HALL, 1977]. Diz-se que uma vibração é livre quando ela se desenvolve na ausência de forças externas [PRODONOFF, 1990].

As vibrações forçadas de um sistema ocorrem quando o sistema é submetido a uma força periódica ou quando está elasticamente ligado a um suporte que tem um movimento alternado [BEER, 1994].

Não havendo nenhuma força interna se opondo ao movimento a vibração se processa sem amortecimento [PRODONOFF, 1990].

Na natureza não existe uma vibração sem nenhum amortecimento. Por menor que seja ele sempre está presente. Este amortecimento será responsável pela atenuação do movimento, tendendo a diminuir a sua amplitude com o tempo [PRODONOFF, 1990].

2.1.3. Decremento Logarítmico, “ δ ”

O decremento logarítmico representa a taxa que a amplitude de um sistema amortecido decai. É definido como a razão de duas amplitudes sucessivas [LARANJA, 2004]. O decremento logarítmico pode ser calculado pela Equação 1 ou pela Equação 2.

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \left(\ln \frac{X_0}{X_n} \right) \quad \text{Equação 1}$$

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

δ é o decremento logarítmico, *adimensional*

n é o número de picos, *adimensional*

X_0 é a amplitude do primeiro pico analisado, *em m/s^2*

X_n é a amplitude do último pico analisado, *em m/s^2*

ζ é o índice de amortecimento, *adimensional*

2.1.4. Coeficiente de Amortecimento “ c ”

O coeficiente de amortecimento linear longitudinal é relação entre a força e a velocidade relativa entre as extremidades do elemento, ambas medidas no mesmo instante [LARANJA, 2004].

Define-se o amortecimento crítico pela Equação 3 que vem a ser o valor de coeficiente de amortecimento que anula a expressão $c^2 - 4mk$ [WOLTER, 1998].

$$c_{cr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{mk} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

c é o coeficiente de amortecimento do amortecedor, em *$N.s/m$*

c_{cr} é o coeficiente de amortecimento crítico, em $N.s/m$

m é a massa adicionada ao sistema, em kg

ω_n é a frequência natural, em rad/s

k é a constante de elasticidade da mola, em N/m

2.1.5. Índice de Amortecimento “ ζ ”

A relação entre o coeficiente real de amortecimento do sistema e o crítico é chamada de razão ou índice de Amortecimento [LARANJA, 2004].

2.1.6. Amortecimento do Movimento

Um movimento pode ser sub-amortecido, criticamente amortecido ou super-amortecido. As características destes movimentos serão vistos a seguir.

2.1.6.1. Movimento Sub-amortecido “ ζ ” < 1

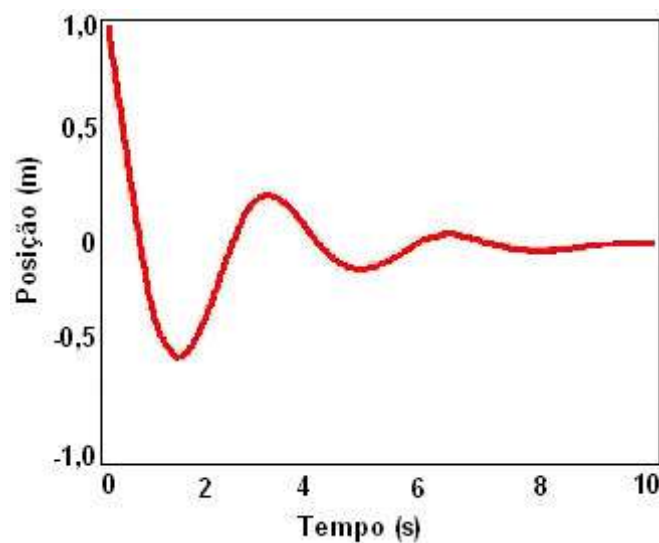


Figura 2 – sistema sub-amortecido [WOLTER, 1998]

Quando $c^2 - 4mk < 0$ ou, analogamente, $\zeta < 1$. Neste caso, ocorre oscilação. A solução gráfica para um sistema com $m=1$, $k=4$ e $c=1$ é mostrada na Figura 2 [WOLTER, 1998].

2.1.6.2. Movimento Criticamente Amortecido “ ζ ” = 1

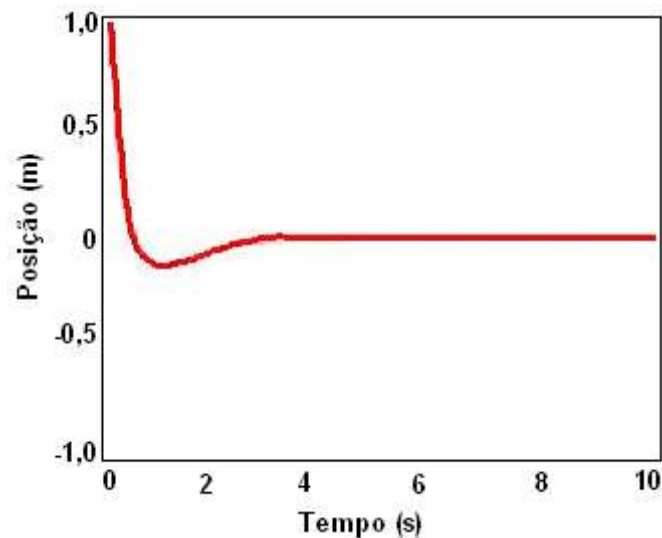


Figura 3 – sistema criticamente amortecido [WOLTER, 1998]

Neste caso $c^2 - 4mk = 0$ ou $\zeta = 1$. Não há oscilação, isto é, a massa não passa pela sua posição original com o mesmo sentido da sua velocidade inicial uma Segunda vez. Plotamos novamente a resposta do sistema anterior com $c=4$ na Figura 3 [WOLTER, 1998].

2.1.6.3. Movimento Super-amortecido “ ζ ” > 1

Neste caso $c^2 - 4mk > 0$ ou $\zeta > 1$. Neste caso, também não há oscilação. A resposta do sistema para $c=6$ plotada está apresentada na Figura 4 [WOLTER, 1998].

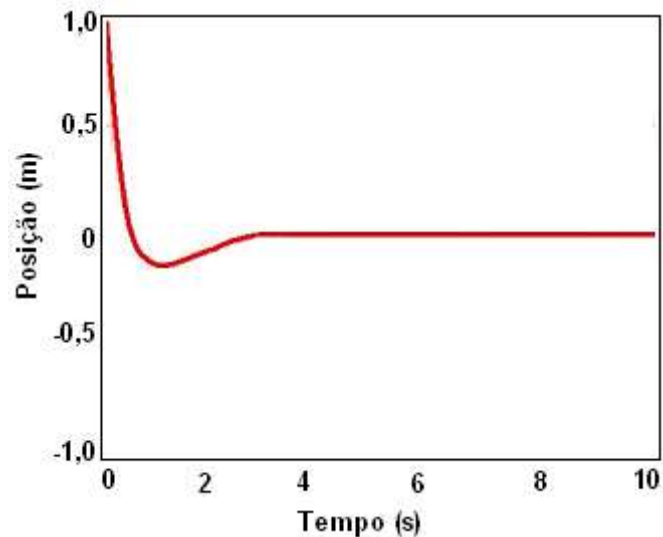


Figura 4 – sistema super-amortecido [WOLTER, 1998]

2.2. Amortecedores

Um amortecedor hidráulico (Figura 5) é constituído por um conjunto de pistão e válvulas, fixados a uma haste e que se movem dentro de um tubo com óleo específico para altas temperaturas e pressões. As válvulas regulam a passagem do óleo controlando a velocidade da haste [DANA, 2005].

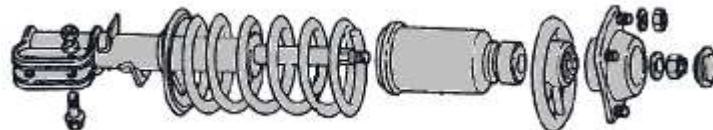


Figura 5 – amortecedor hidráulico [WEBMOTORS, 2005]

2.3. Molas

Molas são elementos de máquinas, que caracterizam-se por apresentar grandes deformações sem que o material ultrapasse o limite elástico [MELCONIAN, 2003].

As molas têm a função de suportar e aplicar forças. Fazer avançar ou recuar componentes de máquinas proporcionar deformações, absorver choques e energia.

Existem diversos tipos de molas como: helicoidais, de torção, de lâminas e prato. Para o trabalho foi utilizada uma mola helicoidal [ANTUNES, 1998].

As molas helicoidais são utilizadas para esforços de tração e compressão. Suas utilizações práticas são em suspensão de automóveis, sistemas de segurança de elevadores, controle de fluxo em válvulas e torneiras, etc [MELCONIAN, 2003].

2.4. Acelerômetros

Os acelerômetros piezelétricos são transdutores de aceleração de grande versatilidade. Basicamente o sinal em um acelerômetro está produzido por um cristal piezelétrico que ao ser pressionado por uma massa vibrante emite um sinal elétrico que pode ser medido em voltagem ou carga, segundo o pré-amplificador utilizado. Essa saída elétrica é diretamente proporcional à aceleração da base do acelerômetro, quando a excitação está dentro da faixa de frequência e da faixa dinâmica do acelerômetro. Em termos gerais os acelerômetros tem uma faixa de frequências de operação muito ampla, normalmente de 5 a 5000 Hz , embora existam acelerômetros que cobrem a faixa de 1 a 40000 Hz . A faixa de amplitude é grande, pode ir de 0,01 m/s^2 até 100.000 m/s^2 [LARANJA, 2004].

3. MÉTODO

3.1. Definição do Equipamento e Suas Necessidades

O equipamento projetado deve ser capaz de apresentar o gráfico da curva senoidal amortecida, através da qual podem ser calculados os coeficientes de amortecimento de diferentes amortecedores de automóveis e motocicletas.

3.2. Estudo de Diferentes Formas de Desenvolvimento do Projeto

Existem diferentes formas de montar o equipamento. A primeira forma é com a mola acoplada ao amortecedor, que apresenta problemas num equipamento que deve trabalhar com diferentes amortecedores, uma vez que seria necessário utilizar uma mola específica para cada amortecedor. O esquema dessa forma de montagem é apresentado na Figura 6.

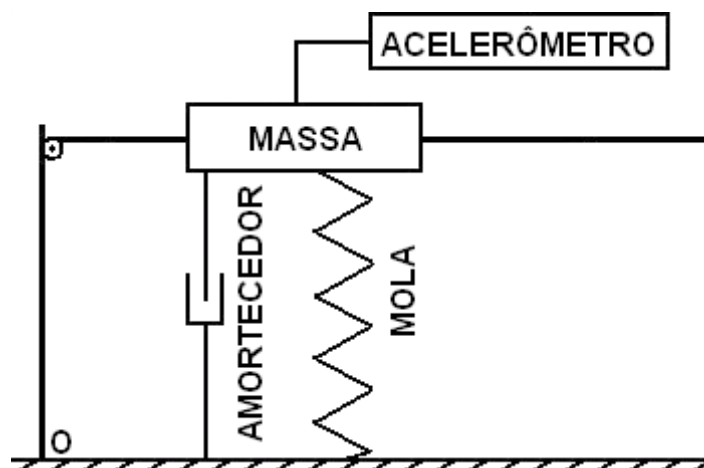


Figura 6 – primeira possibilidade de desenvolvimento do equipamento

Uma segunda maneira, apresentada na Figura 7, seria com o amortecedor colocado após a massa e a mola. Essa forma não é satisfatória, pois a velocidade de retorno da haste do amortecedor é insuficiente devido ao coeficiente de amortecimento equivalente na linha de ação da massa ser muito alto, provocando uma frequência natural abaixo do limite de operação do acelerômetro.

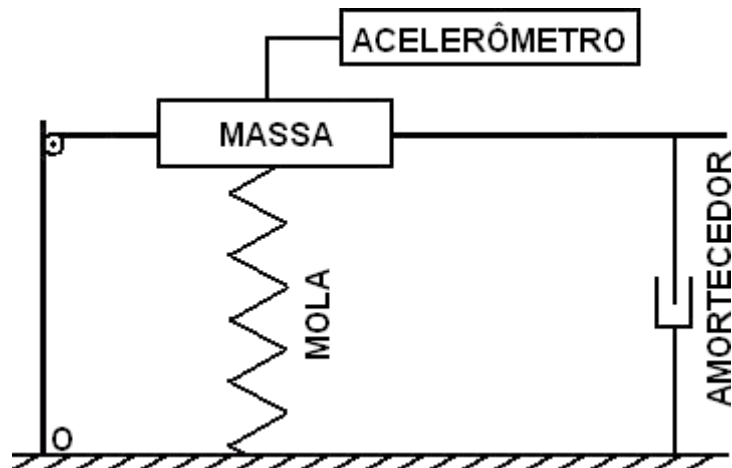


Figura 7 – segunda possibilidade de desenvolvimento do equipamento

O modelo utilizado no trabalho, Figura 8, possui uma massa colocada sobre um braço oscilante colocada após a mola e o amortecedor, que é o método que possibilita a movimentação da haste do cilindro dentro dos limites de operação do acelerômetro.

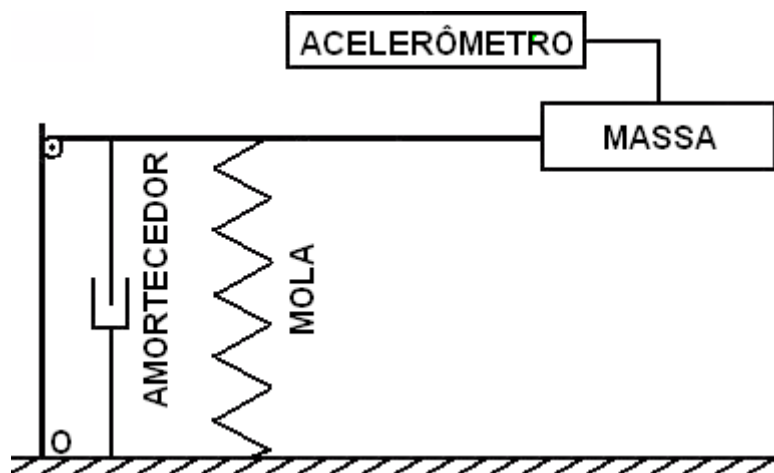


Figura 8 – modelo utilizado para o equipamento

3.3. Método para Obtenção do Coeficiente de Amortecimento do Amortecedor

O esquema do equipamento desenvolvido, com a mola colocada entre a massa e o amortecedor é apresentado na Figura 9.

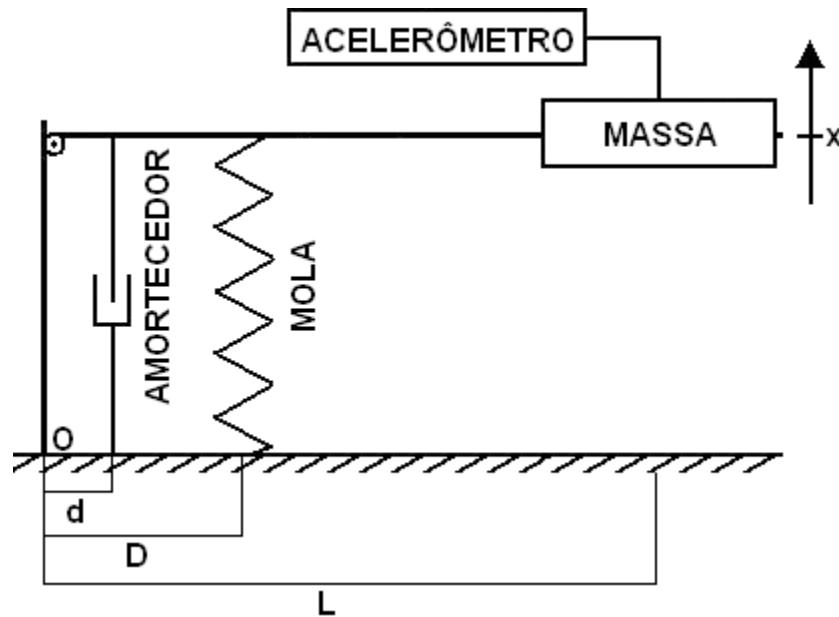


Figura 9 – esquema do equipamento

Através do gráfico da curva senoidal amortecida obtido através do acelerômetro obtém-se a frequência natural amortecida do sistema, “ q ”, e as amplitudes “ X_0 ” e “ X_n ”. Lembrando a Equação 1 é possível calcular o decremento logarítmico, “ δ ”:

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \left(\ln \frac{X_0}{X_n} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Lembrando a Equação 2, a partir do decremento logarítmico, “ δ ”, é possível obter o índice de amortecimento, “ ζ ”, pela Equação 2:

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad \text{Equação 2}$$

A frequência natural do sistema, “ ω_n ”, é definida pela Equação 4:

$$\omega_n = \frac{q}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

q é a frequência natural amortecida do sistema, em rad/s

A equação 5 permite calcular o coeficiente de amortecimento equivalente atuando na massa, “ c_{eq} ”.

$$\omega_n \cdot \zeta = \frac{c_{eq}}{2m} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

c_{eq} é o coeficiente de amortecimento na linha de ação da massa, em $N.s/m$

Pelo somatório de momentos em relação à origem, "o", é possível determinar o coeficiente de amortecimento do amortecedor, "c", através da Equação 6.

$$F_1 \cdot L = F_2 \cdot d$$

$$c \cdot (\sin \phi \cdot d) \cdot d = c_{eq} \cdot (\sin \phi \cdot L) \cdot L$$

$$c = c_{eq} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^2 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

L é a distância da massa até a origem do sistema, em m

d é a distância do amortecedor até a origem do sistema, em m

F_1 é a força atuante na linha de ação da massa, em N

F_2 é a força atuante na linha de ação do amortecedor, em N

ϕ é o ângulo formado pelo braço oscilante o suporte em "L", em *radianos*

3.4. Dimensionamento de Todos os Componentes

O equipamento é constituído de 5 partes (suporte em "L", braço oscilante, amortecedor, mola e acelerômetro) que precisam ser dimensionadas.

Considerando as características da Tabela 1 não foi necessário cálculo de resistência dos materiais para a estrutura, pois todos os componentes disponíveis para construção do equipamento são de aço SAE 1010, e possuem espessuras muito superiores as necessárias para suportar a massa máxima (21,15 kg) utilizada.

Características do aço SAE 1010		
Tensões de Tração (MPa)	Escoamento	220
	Ruptura	380
Módulo de Elasticidade (MPa)		205.000
Módulo de Elasticidade Transversal (MPa)		80.500

Tabela 1 – características do Aço SAE 1010. [MASUERO, 1997]

3.4.1. Definições Iniciais

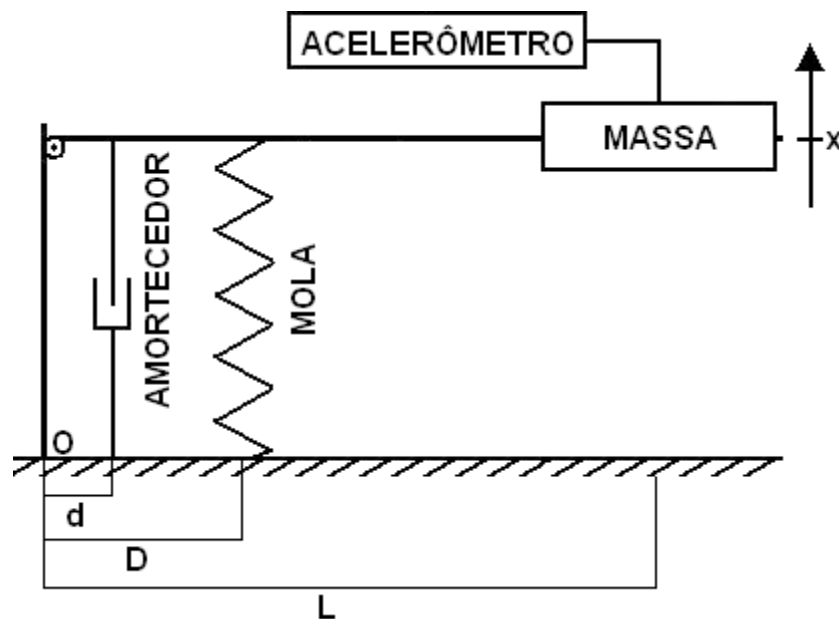


Figura 10 – esquema do equipamento

A mola utilizada tem a constante de elasticidade de $5,7 \cdot 10^4 \text{ N/m}$.

O posicionamentos da mola é variável para que possa ser ajustado para diferentes amortecedores, com objetivo de obter uma frequência natural dentro do limite de operação do acelerômetro.

A posição da massa é fixa na extremidade do braço (a $0,910 \text{ m}$ da origem).

O valor da massa mínima adicionada ao sistema (valor equivalente da massa do braço oscilante na extremidade) é obtido através da Equação 7 [RAO, 1995].

$$m = m_B \cdot 0,23 \quad \text{Equação 7}$$

$$m = m_B \cdot 0,23 = 5 \cdot 0,23 = 1,15 \text{ kg}$$

Onde:

m_B é a massa do braço oscilante, em kg

Como o posicionamento do suporte do amortecedor (diâmetro de $0,050 m$) deve estar o mais próximo possível da origem ($0,082 m$) o posicionamento mínimo da mola (diâmetro do tubo de alinhamento de $0,098 m$) será a $0,156 m$ da origem.

Para o cálculo da deformação na mola é utilizada a Equação 8.

$$F = k \cdot x \therefore (m \cdot g) = k_{eq} \cdot x'$$

$$x' = \frac{(m \cdot g)}{k \cdot \left(\frac{D^2}{L^2}\right)} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

x' é a deformação da mola, em m

F é a força aplicada na mola, em N

D é a distância da mola até a origem do sistema, em m

k_{eq} é a constante de elasticidade da mola equivalente na linha de ação da massa, em N/m

Para o cálculo do ângulo “ Φ ” é utilizada a Equação 9.

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{x'}{D}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Para o cálculo do deslocamento x'' na linha de ação da massa é utilizada a Equação 10.

$$x'' = \tan \Phi \cdot L \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

x'' é o deslocamento na linha de ação da massa, em m

Considerando a posição da mola a $0,205\text{ m}$ da origem (posição ideal obtida experimentalmente para o amortecedor testado) e variando apenas a massa de $1,15\text{ kg}$ até $21,15\text{ kg}$, obtém-se os dados da Tabela 2, e o comportamento do deslocamento na linha de ação da massa, x'' , na Figura 11. Para realização das Tabelas 2 e 3 foi desenvolvida uma planilha em MS Excel (Anexo D) utilizando as equações 7, 8, 9 e 10.

D (m)	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205
m (kg)	1,15	3,65	6,15	8,65	11,15	13,65	16,15	18,65	21,15
x'' (m)	0,017	0,055	0,093	0,130	0,168	0,205	0,243	0,281	0,318

Tabela 2 – tabela com a variação da massa

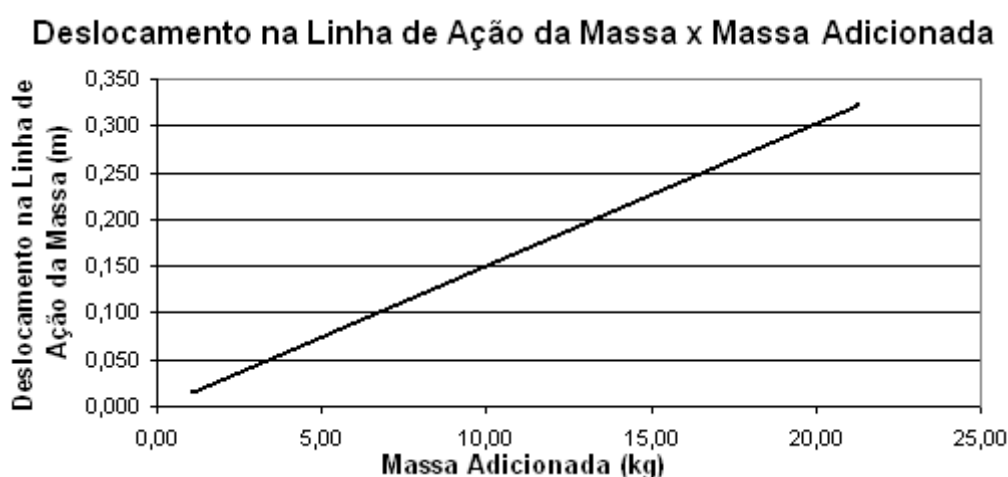


Figura 11 – comportamento do deslocamento na linha de ação da massa com a variação da massa

Considerando a massa mínima (massa do próprio braço oscilante na sua extremidade) adicionada de $1,15\text{ kg}$ e variando apenas a posição da mola de $0,156\text{ m}$ até $0,861\text{ m}$, obtém-se os dados da Tabela 3, e o comportamento do deslocamento na linha de ação da massa, x'' , na Figura 12.

D (m)	0,156	0,205	0,244	0,332	0,420	0,509	0,597	0,685	0,773	0,861
m (kg)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
x'' (m)	0,039	0,017	0,010	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000

Tabela 3 – tabela com a variação da posição da mola

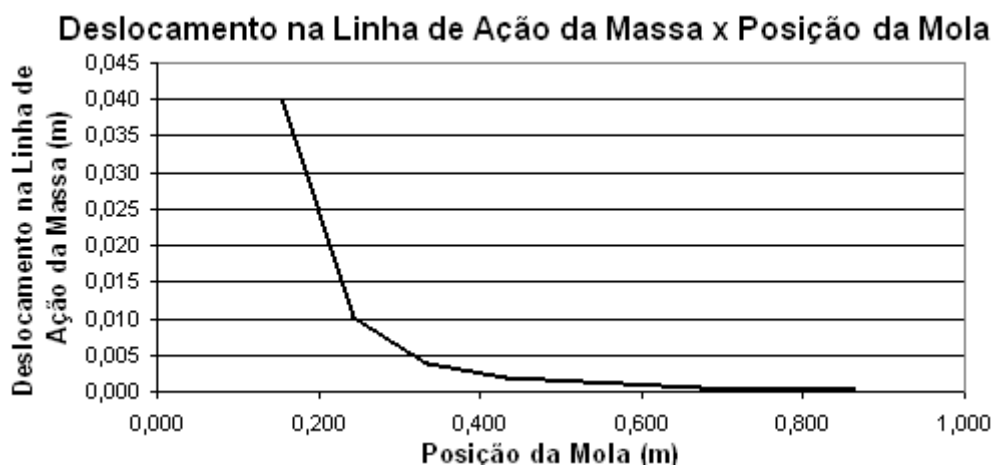


Figura 12 – comportamento do deslocamento na linha de ação da massa com a variação da posição da mola

3.4.2. Componentes do Equipamento

O equipamento foi dividido em 5 componentes: Suporte em “L”, Braço Oscilante, Amortecedor, Mola e Acelerômetro, que serão vistos a seguir.

3.4.2.1 Suporte em “L”

O suporte em forma de “L”, apresentado na Figura 13, tem a função sustentação e interligação dos componentes do equipamento.

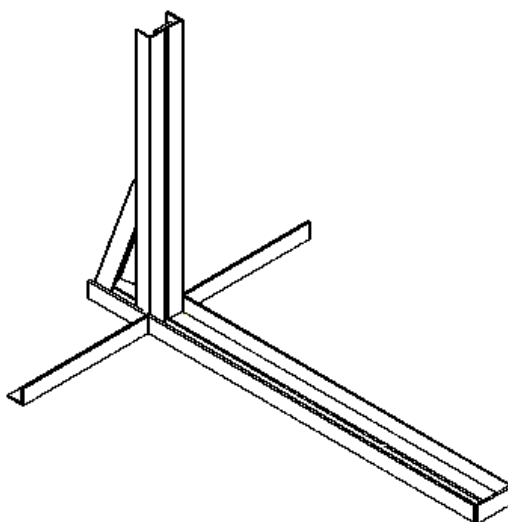


Figura 13 – suporte em “L”

O suporte em “L” é composto de 7 partes conforme a Tabela 4 (desenho das partes no Anexo B):

Todas as partes são soldadas.

Código	Descrição	Quantidade
Componente 1 - Parte 1	Cantoneiras Verticais	2 peças
Componente 1 - Parte 2	Chapa da Parte Frontal	1 peça
Componente 1 - Parte 3	Cantoneiras Horizontais	2 peças
Componente 1 - Parte 4	Cantoneiras de Sustentação Lateral	2 peças
Componente 1 - Parte 5	Cantoneiras de Sustentação Inclinadas	2 peças
Componente 1 - Parte 6	Chapa de Sustentação do Mancal	1 peça
Componente 1 - Parte 7	Chapa de Fixação	1 peça

Tabela 4 – tabela de partes do suporte em “L”

3.4.2.2. Braço Oscilante

O braço oscilante transmite o momento da força aplicada na sua extremidade para a haste do amortecedor.

O braço oscilante é composto basicamente por duas cantoneiras e um mancal com rolamento para um eixo de 25 *mm* de diâmetro, o que possibilita uma facilidade de alinhamento e diminuição do atrito em relação à utilização de dois mancais com uma barra posicionada entre eles.

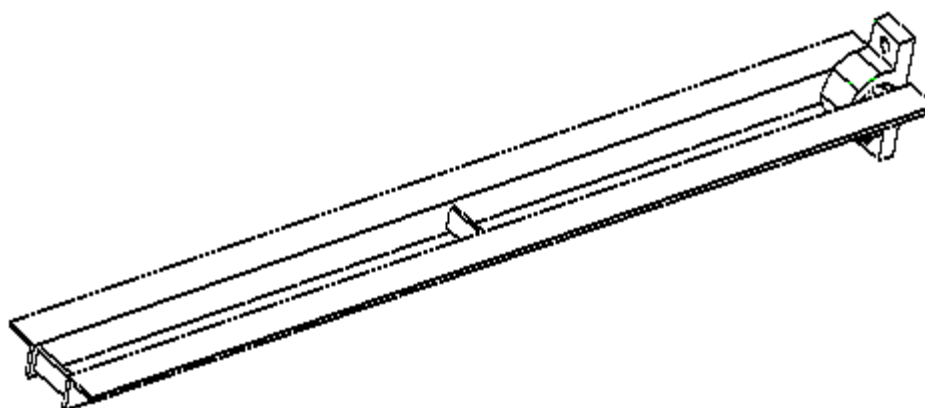


Figura 14 – braço oscilante

O braço oscilante é composto de 4 partes conforme a Tabela 5 (desenho das partes no Anexo B):

As chapas de fixação são soldadas às cantoneiras e para fixação do mancal às cantoneiras é utilizado um parafuso, com porca, de comprimento 100 *mm* e bitola 7 *mm*.

Código	Descrição	Quantidade
Componente 2 - Parte 1	Cantoneira para o Braço Oscilante	2 peças
Componente 2 - Parte 2	Chapa de Fixação da Massa e do Braço Oscilante	2 peças
Componente 2 - Parte 3	Eixo do Mancal	1 peça
Componente 2 - Parte 4	Mancal	1 peça

Tabela 5 – tabela de partes do braço oscilante.

3.4.2.3. Amortecedor

É o componente do qual deve ser obtido o coeficiente de amortecimento.

A fixação do amortecedor ao suporte é feita por um parafuso, com porca, de comprimento 80 *mm* e bitola 8 *mm*.

A fixação do amortecedor ao braço oscilante é feita por um parafuso, com porca, de comprimento 80 *mm* e bitola 8 *mm*.

Para utilização de amortecedores de automóveis é utilizado um adaptador, para amortecedores de motocicletas o encaixe é “direto”.

O sistema para fixação do amortecedor é composto por 2 partes conforme a Tabela 6 (desenho das partes no Anexo B):

Código	Descrição	Quantidade
Componente 3 - Parte 1	Suporte do Amortecedor	1 peça
Componente 3 - Parte 2	Adaptador para Amortecedores de Automóveis e Motocicletas	1 peça

Tabela 6 – tabela de partes do sistema de fixação do amortecedor.

3.4.2.4. Molas

As molas tem a função de fazer oscilar o braço oscilante.

Foi medido o coeficiente de elasticidade “ k ” de 4 molas utilizando o equipamento *Medições de Constantes de Elasticidade* do Laboratório de Medições Mecânicas da ULBRA.

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos para as 4 molas analisadas (obtenção das constantes de elasticidade das molas no Anexo A) para a montagem do equipamento:

Característica	“Mola 1”	“Mola 2”	“Mola 3”	“Mola 4”
Constante de Elasticidade (N/m)	$1,8 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$5,7 \cdot 10^4$
Comprimento (m)	0,195	0,210	0,195	0,254
Diâmetro (m)	0,048	0,051	0,048	0,088

Tabela 7 – características das molas 1, 2, 3 e 4

A mola escolhida foi a “Mola 4” devido a sua constante de elasticidade mais elevada em relação as demais. A constante de elasticidade foi a característica mais importante na avaliação, uma vez que influi diretamente na frequência natural do sistema.

O sistema para fixação da mola é composto por 2 partes conforme a Tabela 8 (desenho das partes no Anexo B):

Código	Descrição	Quantidade
Componente 4 - Parte 1	Tubo para Alinhamento Mola-Suporte	1 peça
Componente 4 - Parte 2	Suporte Interno para Posicionamento da Mola	1 peça

Tabela 8 – tabela de partes do sistema de fixação da mola.

3.4.2.5. Acelerômetro

O acelerômetro utilizado foi o ADXL250 da Analog Devices (características no Anexo C). A frequência, devido aos limites de operação do acelerômetro disponível, deverá ficar entre 0 e 800 Hz.

3.4. Montagem

O equipamento montado tem a forma apresentada na Figura 15.

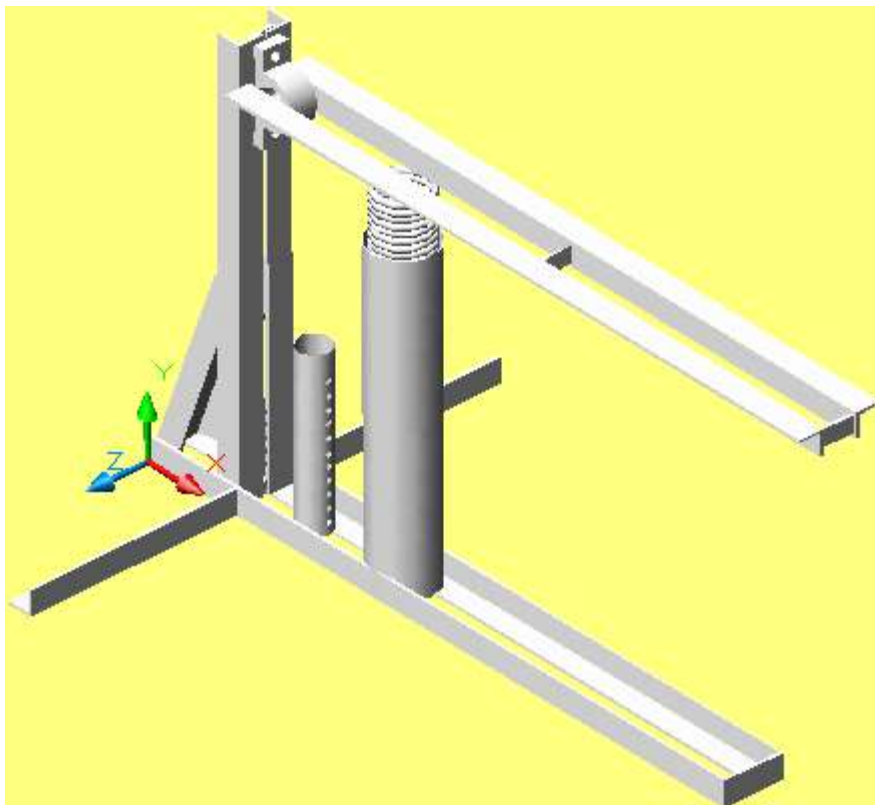


Figura 15 – equipamento montado

3.5. Testes

Para obtenção da curva senoidal amortecida é necessário analisar 2 variáveis: massa a ser adicionada na extremidade do braço oscilante e a distância que a mola deve estar da origem.

Com o acelerômetro fixado sobre a extremidade do braço oscilante se fazem os ajustes necessários para que se obtenha uma frequência natural e uma amplitude que além de estarem dentro do limite de operação do acelerômetro, permitam calcular com clareza o decremento logarítmico.

É possível determinar através das Equações 8, 9 e 10 que quanto mais próxima a mola estiver do amortecedor maior será a amplitude da curva do sistema massa-mola. No entanto, como não é possível prever a amplitude da frequência natural amortecida é necessário que se façam alguns ajustes no momento da obtenção da curva.

3.5.1. Obtenção do Coeficiente de Amortecimento

Para obtenção dos dados que permitirão o cálculo do coeficiente de amortecimento do amortecedor testado utilizou-se um acelerômetro fixado na extremidade do braço oscilante.

O melhor resultado obtido experimentalmente apresentou uma frequência natural amortecida, “ q ”, de 4,98 Hz e amplitudes “ X_0 ” e “ X_n ” de 49,6 mV e 27,2 mV respectivamente (Figura 16). Esse resultado foi obtido com a mola colocada a 0,205m da origem e com o braço oscilante sem carga, apenas com a massa mínima equivalente na sua extremidade de 1,15 kg.

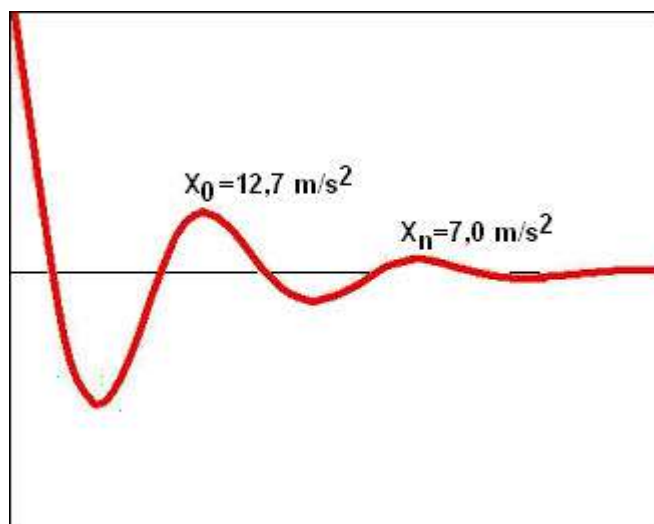


Figura 16 – curva senoidal amortecida para o amortecedor testado

Conforme catálogo do acelerômetro cada mV equivale ao valor da gravidade (considerado como 9,807 m/s²). Portanto os valores das amplitudes “ X_0 ” e “ X_n ” são de 12,8 m/s² e 7,0 m/s² respectivamente.

Os dados de posição da mola, carga no braço oscilante e amplitudes “ X_0 ” e “ X_n ” são suficientes para obtenção do coeficiente de amortecimento.

4. CÁLCULOS

O esquema do equipamento desenvolvido, com a massa e a mola ajustadas para obtenção da curva senoidal amortecida que possibilite o cálculo do coeficiente de amortecimento do amortecedor testado, é apresentado na Figura 17.

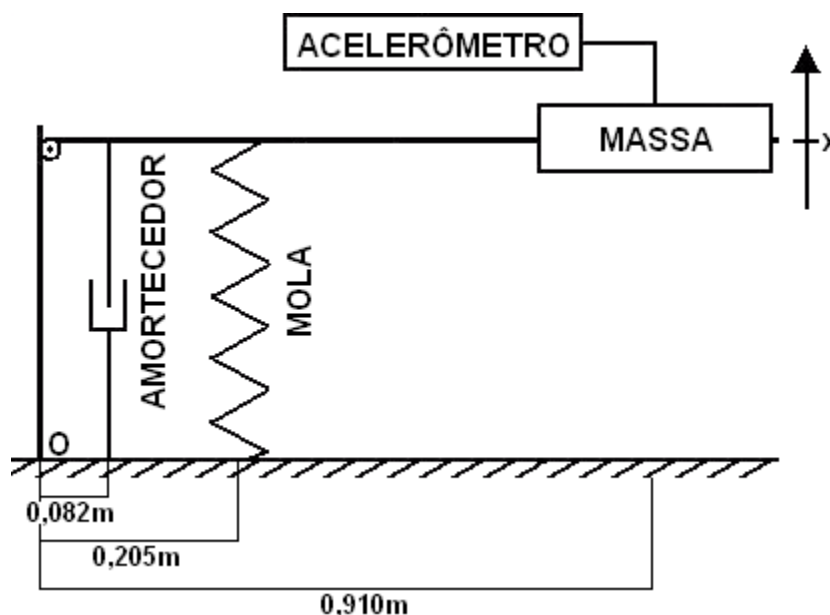


Figura 17 – esquema do equipamento ajustado para o amortecedor testado

Através do gráfico da curva senoidal amortecida obtido através do acelerômetro determinou-se as amplitudes $12,8 \text{ m/s}^2$ e $7,0 \text{ m/s}^2$ para “ X_0 ” e “ X_n ” respectivamente. Com a Equação 1 é possível calcular o decremento logarítmico, “ δ ”:

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \left(\ln \frac{X_0}{X_n} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\ln \frac{49,6}{27,2} \right) = 0,30$$

A partir do decremento logarítmico, “ δ ”, é possível obter o índice de amortecimento, “ ζ ”, pela Equação 2:

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1-\zeta}} \therefore 0,30 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1-\zeta}} \therefore \zeta = 0,05$$

Como a frequência natural amortecida obtida experimentalmente é 4,98 Hz (ou 31,29 rad/s) obtém-se a frequência natural do sistema, “ ω_n ”, pela Equação 4:

$$\omega_n = \frac{q}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{31,29}{\sqrt{1-0,05^2}} = 31,33 \text{ rad / s}$$

A Equação 5 permite calcular o coeficiente de amortecimento equivalente atuando na massa, “ c_{eq} ”:

$$\omega_n \cdot \zeta = \frac{c_{eq}}{2m} \therefore 31,33 \cdot 0,05 = \frac{C_{eq}}{2 \cdot 1,15} \therefore C_{eq} = 3,46 \frac{N \cdot s}{m}$$

O coeficiente de amortecimento do amortecedor, “ c ” é definido pela Equação 6:

$$c = c_{eq} \cdot \left(\frac{L}{d} \right)^2 = 3,46 \cdot \left(\frac{0,910}{0,082} \right)^2 = 4,3 \cdot 10^2 \frac{N \cdot s}{m}$$

Para cálculos de outros amortecedores foi desenvolvido uma planilha em MS Excel (Anexo E) com o mesmo procedimento de cálculo utilizado para o amortecedor testado

5. RESULTADOS

Para o teste realizado com o amortecedor experimentalmente obteve-se:

- A amplitude, “ X_0 ”, de $12,8 \text{ m/s}^2$
- A amplitude, “ X_n ”, de $7,0 \text{ m/s}^2$
- A frequência natural amortecida, q , de $31,29 \text{ rad/s}$
- A frequência natural, ω_n , de $31,33 \text{ rad/s}$

Através dos cálculos obteve-se:

- O decremento logarítmico, “ δ ”, de 0,30
- O índice de amortecimento, “ ζ ”, de 0,05
- O coeficiente de amortecimento, “ c ”, de $4,3 \cdot 10^2 \text{ N.s/m}$

O dado com maior imprecisão utilizado para dimensionamento do equipamento é a constante de elasticidade da mola, “ k ”, pode ser retirado do cálculo com a obtenção da frequência natural amortecida de forma experimental.

A frequência natural amortecida, “ q ”, as amplitudes “ X_0 ” e “ X_n ”, da massa adicionada ao sistema, “ m ” e das distâncias “ d ”, “ D ” e “ L ” (únicos utilizados para o cálculo do coeficiente de amortecimento) possuem imprecisão pequena para o de resultado esperado.

6. CONCLUSÕES

Lembrando dos objetivos propostos para o trabalho que eram:

- Projetar e desenvolver equipamento que possibilite o cálculo dos coeficientes de amortecimento para amortecedores de automóveis e motocicletas.
- Obter o coeficiente de amortecimento de um amortecedor automotivo;
- Desenvolvimento de equipamento variável e de fácil utilização;
- Desenvolver um método de cálculo do coeficiente de amortecimento a partir dos dados obtidos através do equipamento.

Conclui-se:

Foi realizado o projeto e desenvolvimento do equipamento que permite obter a curva senoidal amortecida, que fornece elementos para o cálculo do coeficiente de amortecimento de amortecedores de automóveis e motocicletas.

Obteve-se o coeficiente de amortecimento de $4,3 \cdot 10^2 \text{ N.s/m}$ para o amortecedor automotivo testado.

Para permitir a versatilidade do equipamento e facilidade na troca dos componentes foram tomadas algumas medidas: o posicionamento do suporte do amortecedor e a massa adicionada ao sistema tem locais definidos, enquanto o posicionamento da mola é variável para que possa ser ajustado para diferentes amortecedores, objetivando obter uma frequência natural dentro do limite de operação do acelerômetro.

Para o desenvolvimento do método de cálculo foram utilizadas as equações fundamentais da Mecânica das Vibrações, que permitem obter o coeficiente de amortecimento do amortecedor a partir do decremento logarítmico (extraído da curva senoidal amortecida obtida pelo acelerômetro) aliado aos posicionamentos e dimensionamentos dos componentes do sistema.

Como continuação deste trabalho, pode-se comparar os coeficientes de amortecimento de diversos amortecedores, ou acompanhar a variação do coeficiente de amortecimento ao longo da vida útil do amortecedor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, Izildo. **Elementos de Máquina**. São Paulo: Érica, 1998. 296 p.

BEER, Ferdinand P. **Mecânica Vetorial para Engenheiros**. São Paulo: Pearson Education, 1991-1994. 2 v.

DEN HARTOG, P. **Vibrações nos Sistemas Mecânicos**. São Paulo: E. Blücher, [1986]. 186 p.

LARANJA, Rafael A. C. **Mecânica Vibratória**. Canoas: Ulbra, 2004.

PRODONOFF, Victor. **Vibrações Mecânicas: Simulação e Análise**. Rio de Janeiro: Maity Comunicação, 1990. 220 p.

RAO, S. S. **Mechanical Vibration**. New York : Mc Graw-Hill, 1995.

MASUERO, João Ricardo. **Introdução à Mecânica Estrutural: Isostática e Resistência dos Materiais**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1997. 304 p.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de Máquinas**. São Paulo: Érica, 2003. 358 p

WOLTER, C., SAMPAIO, R. & CATALDO, E. **Vibrações Mecânicas**. AEB – Agência Espacial Brasileira, 1998.

Referências da Internet

COFAP. Disponível em <http://www.cofap.com.br>. Acesso em: 20 mar 2005..

DANA. Disponível em <http://www.dana.com.br>. Acesso em 20 mar 2005.

MONROE. Disponível em <http://www.sa-tenneco-automotive.com>. Acesso em 20 mar 2005.

WEBMOTORS. Disponível em <http://www.webmotors.com.br>. Acesso em 5 jun 2005.

ANEXO A

(Medição das Constantes de Elasticidade das Molas)

Utilizando o equipamento *Medições de Constantes de Elasticidade* do Laboratório de Vibrações da ULBRA mediu-se 3 vezes os deslocamentos em “x” para as força aplicadas. A razão entre a força aplicada e as médias dos deslocamentos em “x” é a constante de elasticidade “K” para cada força aplicada. A média das constantes de elasticidade para cada força aplicada representa a média da constante de elasticidade no intervalo analisado.

MEDIÇÃO DA CONSTANTE DE ELASTICIDADE DAS MOLAS																				
	Mola 1					Mola 2					Mola 3					Mola 4				
F (N)	X ₁ (m)	X ₂ (m)	X ₃ (m)	X _m (m)	K (N/m)	X ₁ (m)	X ₂ (m)	X ₃ (m)	X _m (m)	K (N/m)	X ₁ (m)	X ₂ (m)	X ₃ (m)	X _m (m)	K (N/m)	X ₁ (m)	X ₂ (m)	X ₃ (m)	X _m (m)	K (N/m)
0	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	
98,1	0,006	0,006	0,006	0,006	1,6E+04	0,009	0,009	0,008	0,009	1,1E+04	0,007	0,006	0,006	0,006	1,5E+04	0,002	0,002	0,002	0,002	4,9E+04
196,2	0,010	0,011	0,010	0,010	1,9E+04	0,016	0,016	0,012	0,015	1,3E+04	0,013	0,013	0,013	0,013	1,5E+04	0,004	0,003	0,004	0,004	5,4E+04
294,3	0,016	0,017	0,016	0,016	1,8E+04	0,022	0,023	0,020	0,022	1,4E+04	0,019	0,018	0,019	0,019	1,6E+04	0,006	0,005	0,006	0,006	5,2E+04
392,4	0,020	0,022	0,021	0,021	1,9E+04	0,029	0,029	0,028	0,029	1,4E+04	0,025	0,024	0,025	0,025	1,6E+04	0,008	0,006	0,007	0,007	5,6E+04
490,5	0,027	0,027	0,026	0,027	1,8E+04	0,036	0,037	0,035	0,036	1,4E+04	0,031	0,030	0,031	0,031	1,6E+04	0,010	0,008	0,008	0,009	5,7E+04
588,6	0,032	0,032	0,031	0,032	1,9E+04	0,042	0,042	0,042	0,042	1,4E+04	0,037	0,036	0,036	0,036	1,6E+04	0,012	0,009	0,008	0,010	6,1E+04
686,7	0,037	0,038	0,037	0,037	1,8E+04	0,049	0,048	0,044	0,047	1,5E+04	0,043	0,042	0,043	0,043	1,6E+04	0,013	0,011	0,011	0,012	5,9E+04
784,8	0,042	0,044	0,043	0,043	1,8E+04	0,055	0,054	0,052	0,054	1,5E+04	0,048	0,047	0,047	0,047	1,7E+04	0,014	0,012	0,012	0,013	6,2E+04
882,9	0,047	0,047	0,046	0,047	1,9E+04	0,060	0,061	0,057	0,059	1,5E+04	0,052	0,052	0,052	0,052	1,7E+04	0,016	0,014	0,014	0,015	6,0E+04
K _m (N/m)					1,8E+04					1,4E+04					1,6E+04					5,7E+04

Onde:

Coluna F (N) é a força aplicada sobre a mola, em N

Coluna X₁ (m) é a deformação da mola na primeira medição, em m

Coluna X₂ (m) é a deformação da mola na segunda medição, em m

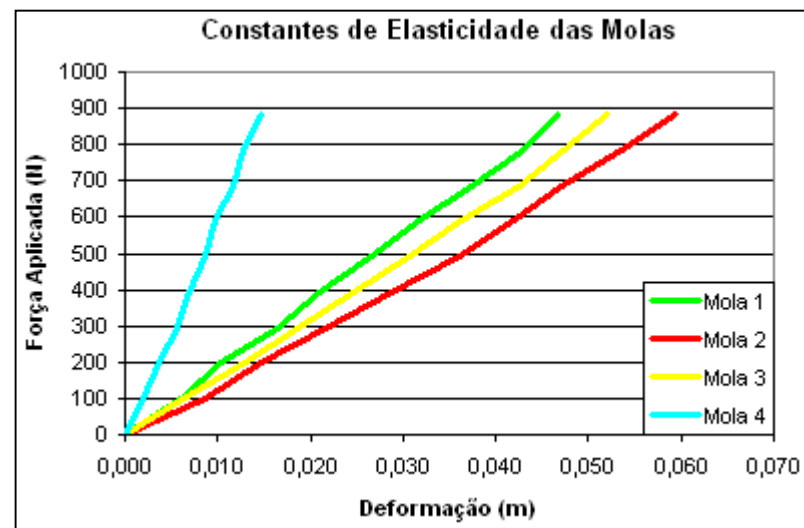
Coluna X₃ (m) é a deformação da mola na terceira medição, em m

Coluna X_m (m) é a média das deformações da mola nas 3 medições, em m

Coluna K (N/m) é a constante de elasticidade da mola para cada força aplicada e média das deformações da mola, em (N/m)

Linha K_m (N/m) é a média das constantes de elasticidades da mola, N/m

Todas as molas foram consideradas lineares pois dentro do limite de operação apresentaram a constante de elasticidade como uma reta no gráfico de deformação por força aplicada.



ANEXO B

(Desenho dos componentes do Equipamento)

TCC

TÍTULO DO DESENHO

QUANTIDADE

Cantoneiras Verticais

2 PEÇAS

CÓDIGO DO DESENHO

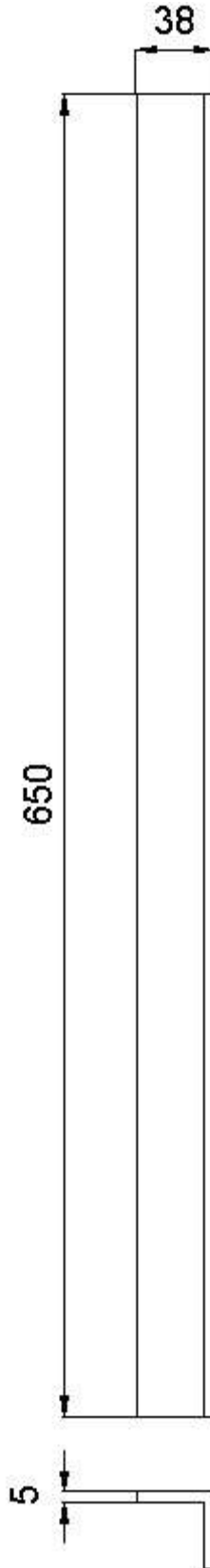
UNIDADE

ESCALA

Componente 1 – Parte 1

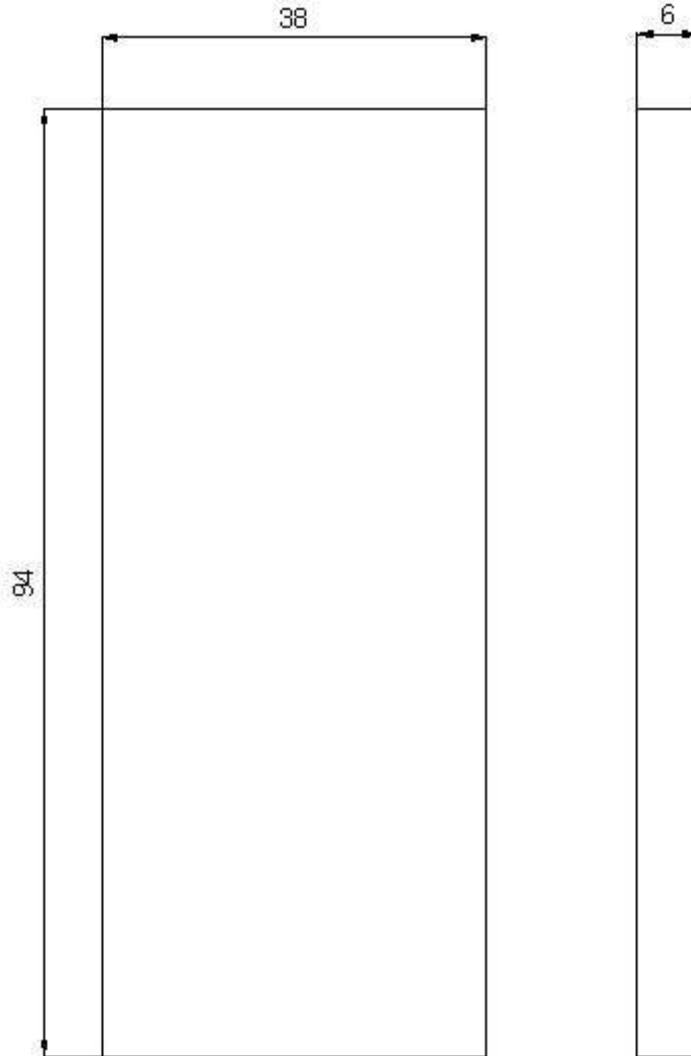
Milímetros

1 : 29,23



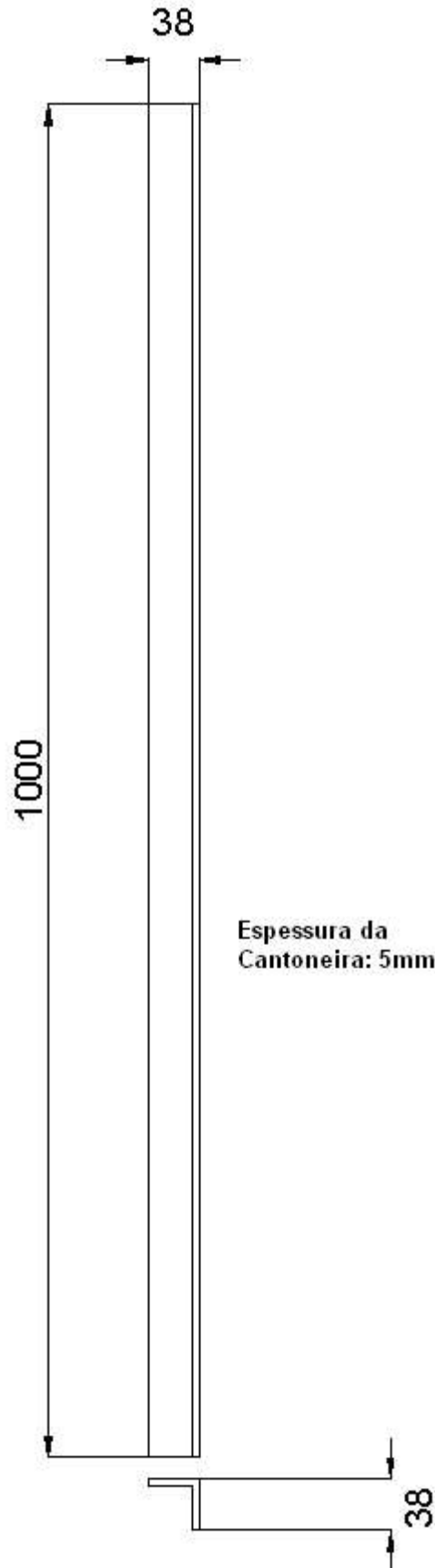
TCC

TÍTULO DO DESENHO		QUANTIDADE
Chapa da Parte Frontal		1 PEÇA
CÓDIGO DO DESENHO	UNIDADE	ESCALA
Componente 1 – Parte 2	Milímetros	1,68 : 1



TCC

TÍTULO DO DESENHO		QUANTIDADE
Cantoneiras Horizontais		2 PEÇAS
CÓDIGO DO DESENHO	UNIDADE	ESCALA
Componente 1 – Parte 3	Milímetros	1 : 4,22



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Cantoneiras de Sustentação Lateral

QUANTIDADE

2 PEÇAS

CÓDIGO DO DESENHO

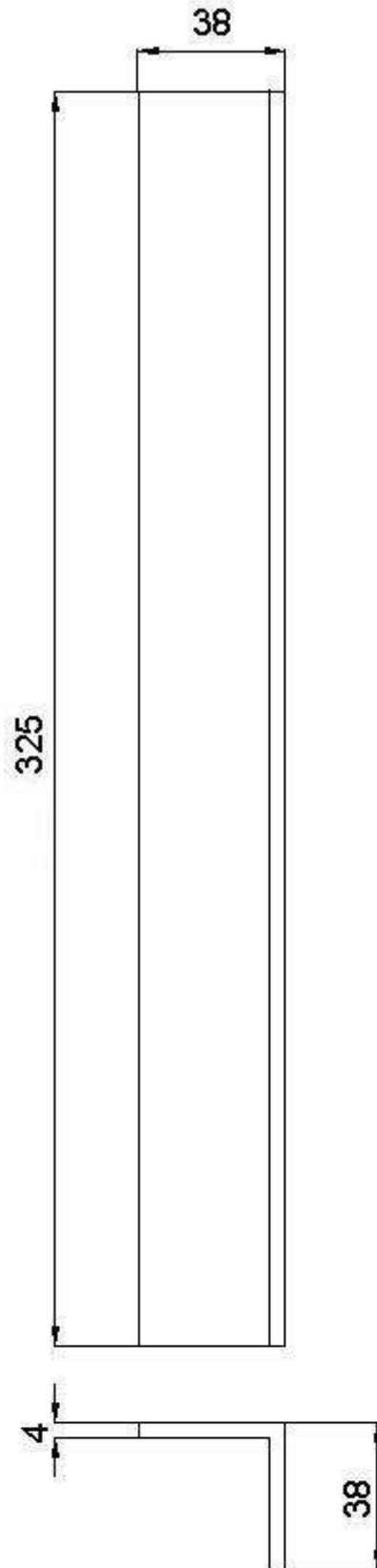
Componente 1 – Parte 4

UNIDADE

Milímetros

ESCALA

1 : 15,20



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Cantoneiras de Sustentação Inclinadas

QUANTIDADE

2 PEÇAS

CÓDIGO DO DESENHO

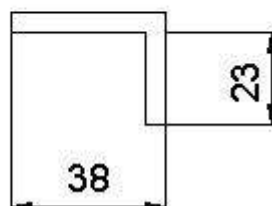
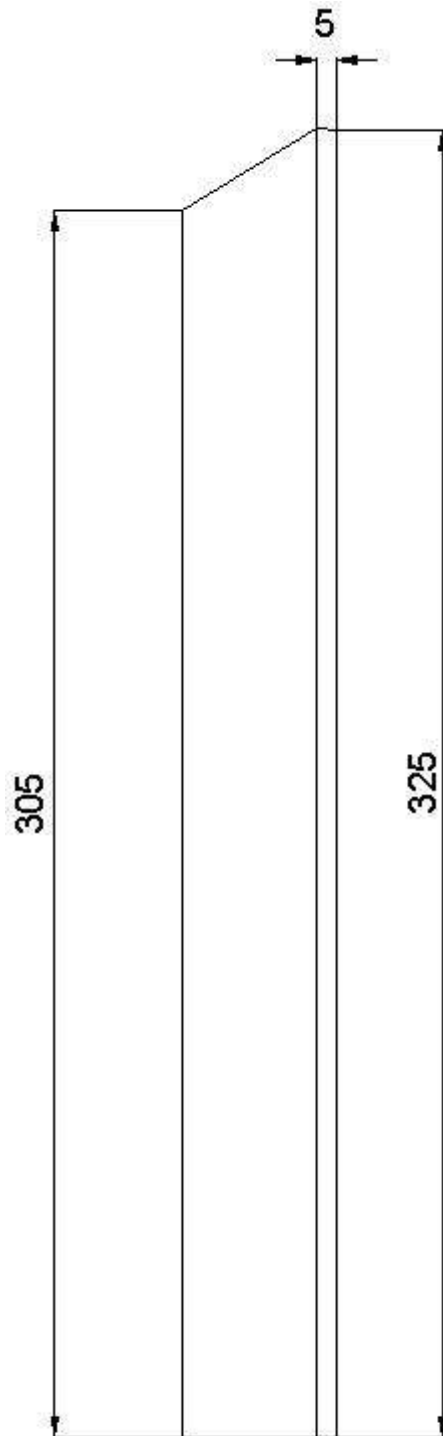
Componente 1 – Parte 5

UNIDADE

Milímetros

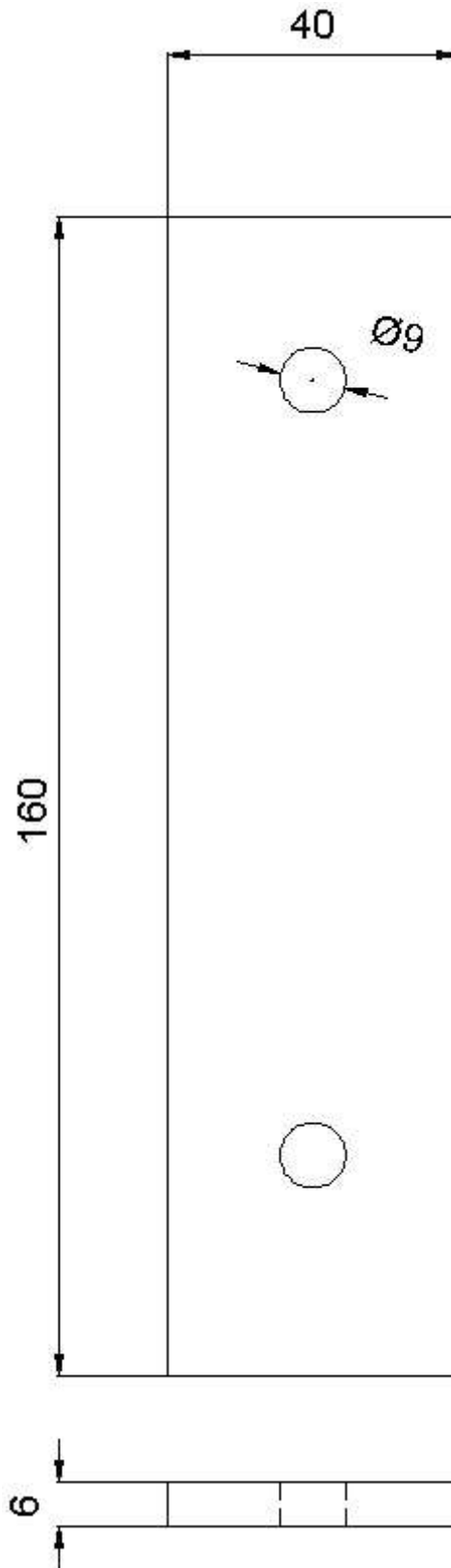
ESCALA

1 : 15,20



TCC

TÍTULO DO DESENHO		QUANTIDADE
Chapa de Sustentação do Mancal		1 PEÇA
CÓDIGO DO DESENHO	UNIDADE	ESCALA
Componente 1 – Parte 6	Milímetros	1,22 : 1



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Chapa de Fixação

QUANTIDADE

1 PEÇA

CÓDIGO DO DESENHO

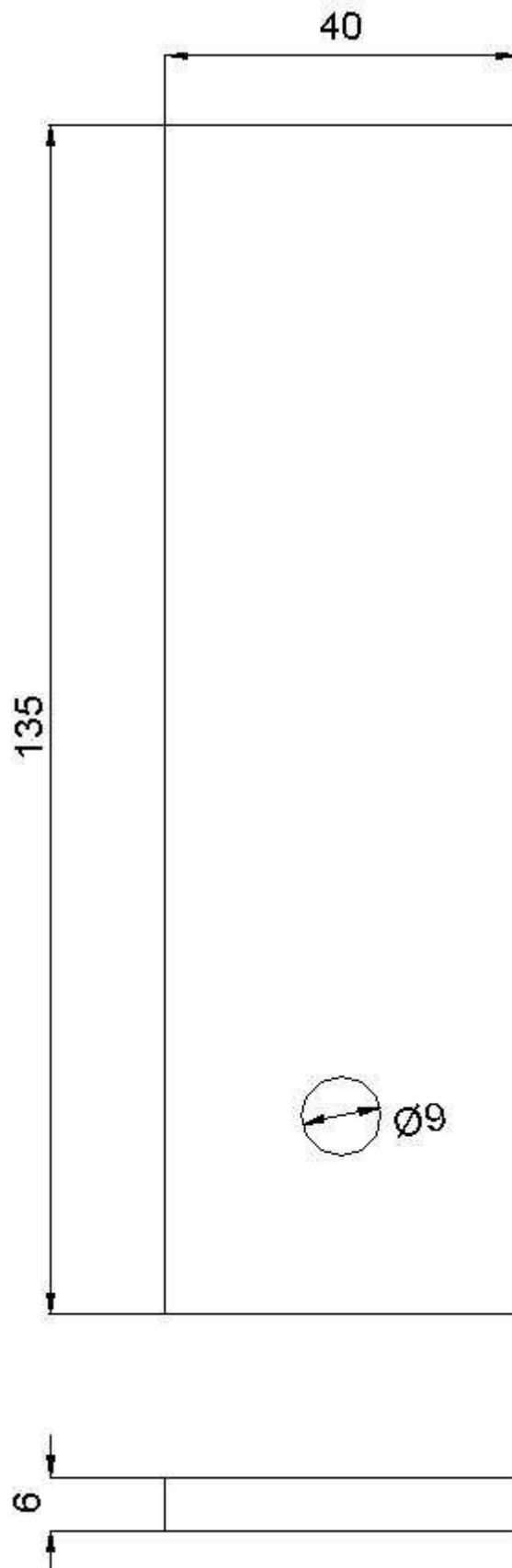
Componente 1 – Parte 7

UNIDADE

Milímetros

ESCALA

1,60 : 1



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Cantoneira para o Braço Oscilante

QUANTIDADE

2 PEÇAS

CÓDIGO DO DESENHO

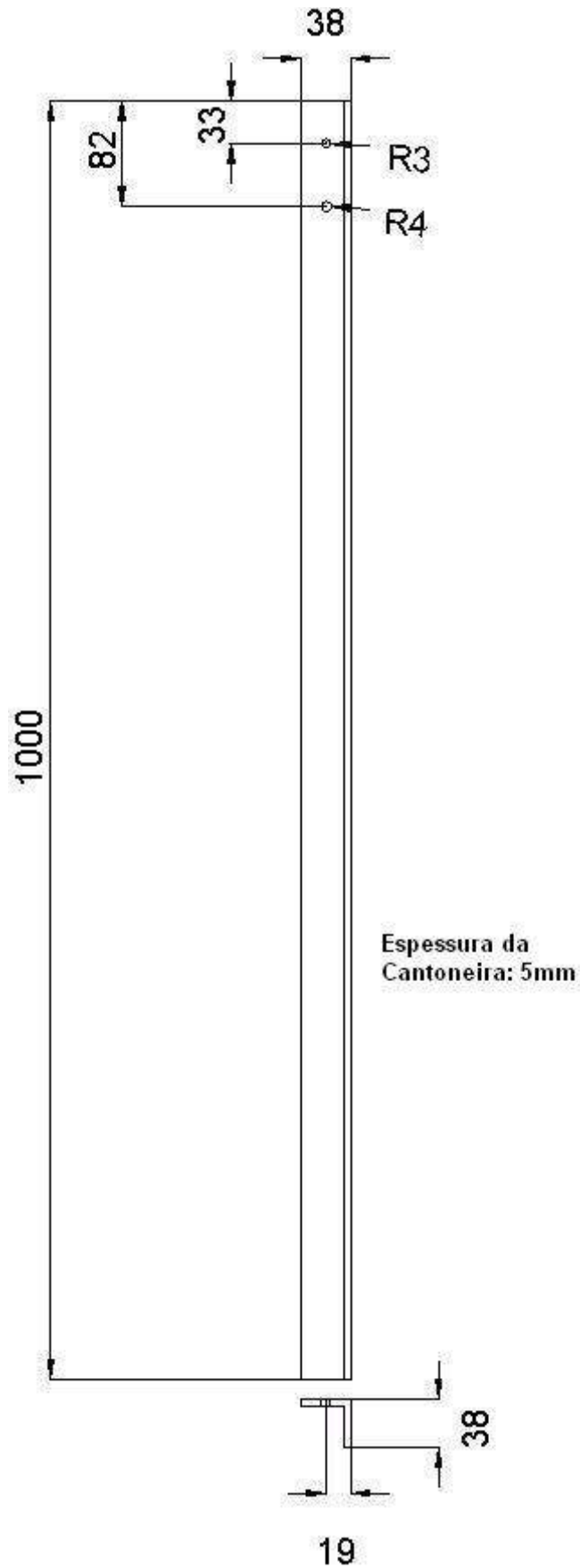
Componente 2 – Parte 1

UNIDADE

Milímetros

ESCALA

1 : 0,26



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Chapa de Fixação da Massa e do Braço Oscilante

QUANTIDADE

2 PEÇAS

CÓDIGO DO DESENHO

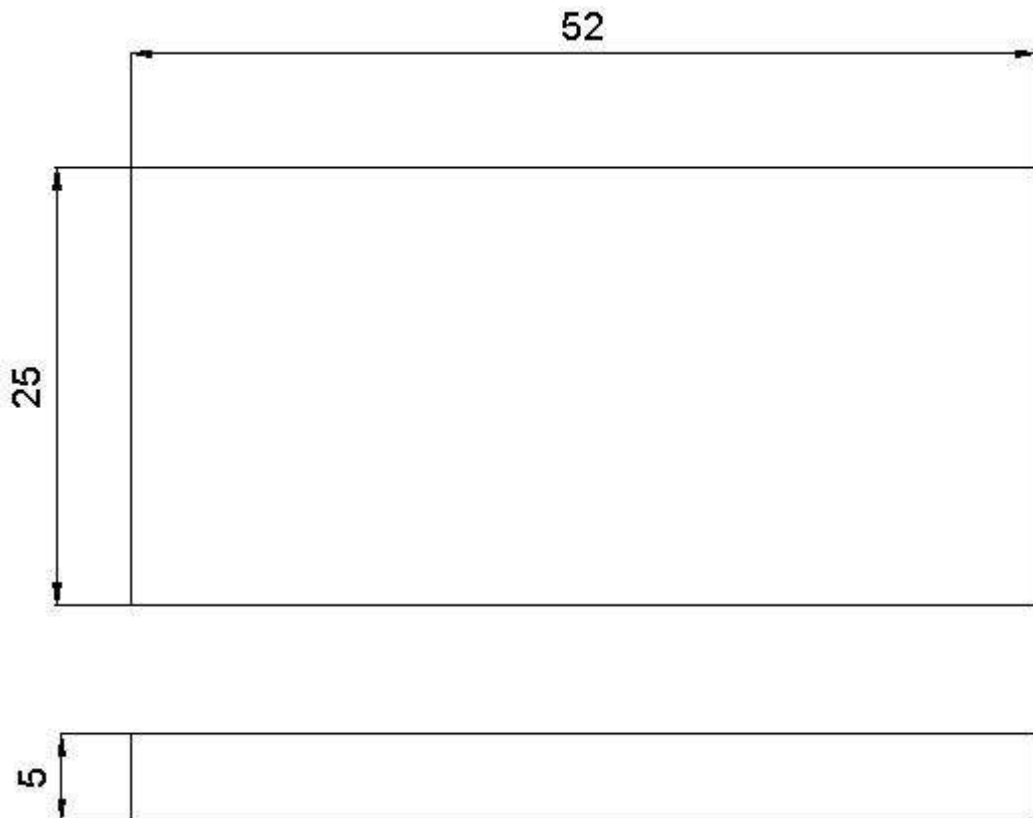
UNIDADE

ESCALA

Componente 2 – Parte 2

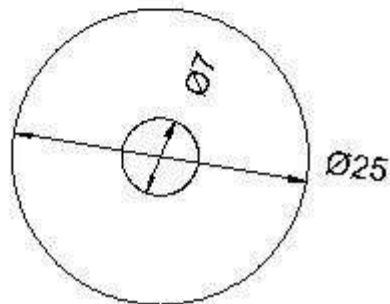
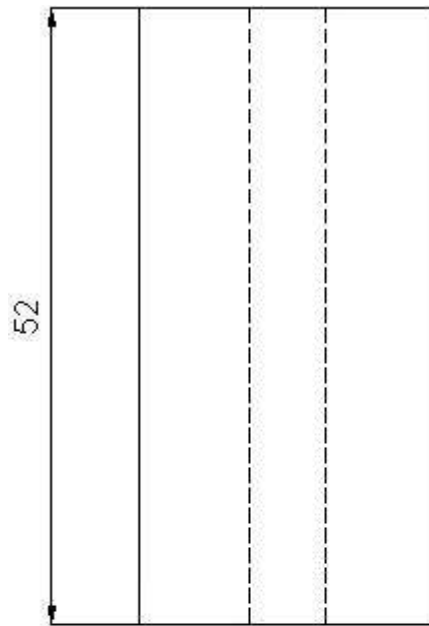
Milímetros

3,44 : 1



TCC

TÍTULO DO DESENHO		QUANTIDADE
Eixo do Mancal		1 PEÇA
CÓDIGO DO DESENHO	UNIDADE	ESCALA
Componente 2 – Parte 3	Milímetros	1,52 : 1



TCC

TÍTULO DO DESENHO

QUANTIDADE

Mancal

1 PEÇA

CÓDIGO DO DESENHO

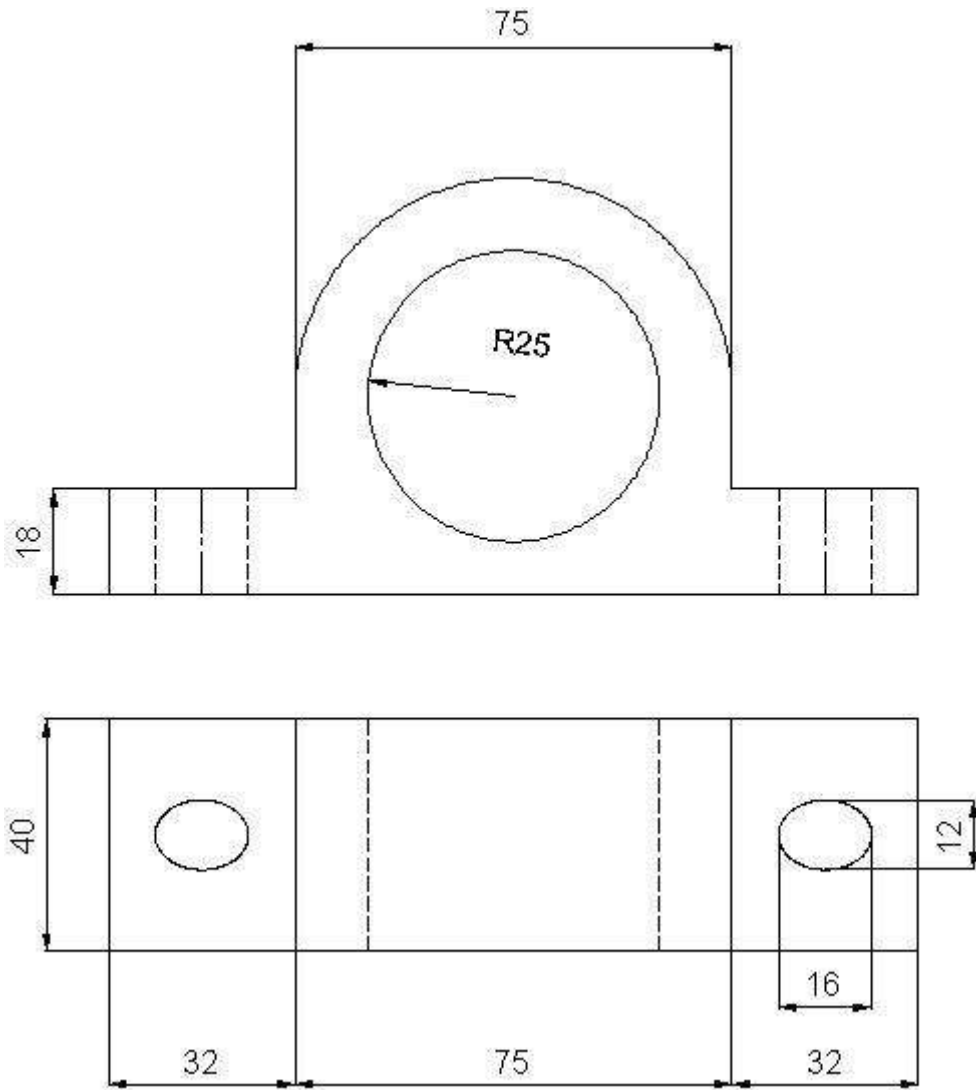
UNIDADE

ESCALA

Componente 2 – Parte 4

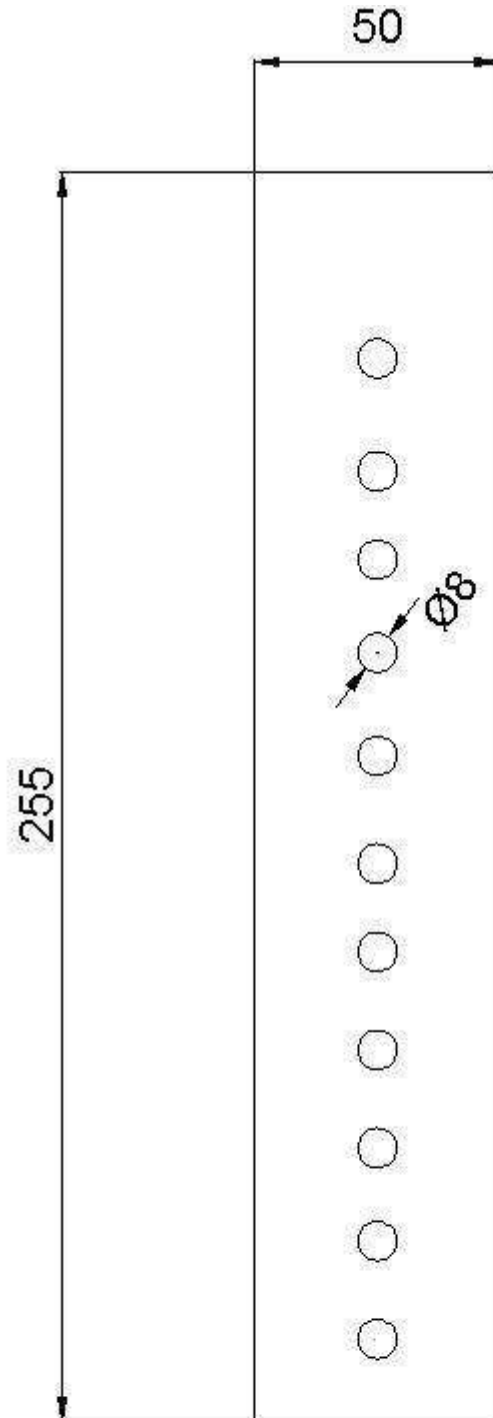
Milímetros

1 : 1,02

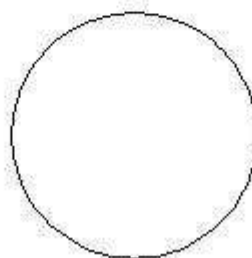


TCC

TÍTULO DO DESENHO		QUANTIDADE
Suporte do Amortecedor		1 PEÇA
CÓDIGO DO DESENHO	UNIDADE	ESCALA
Componente 3 – Parte 1	Milímetros	1 : 1,22



Espessura do
Tubo: 1 mm



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Adaptador para Amortecedores de automóveis e motocicletas

QUANTIDADE

1 PEÇA

CÓDIGO DO DESENHO

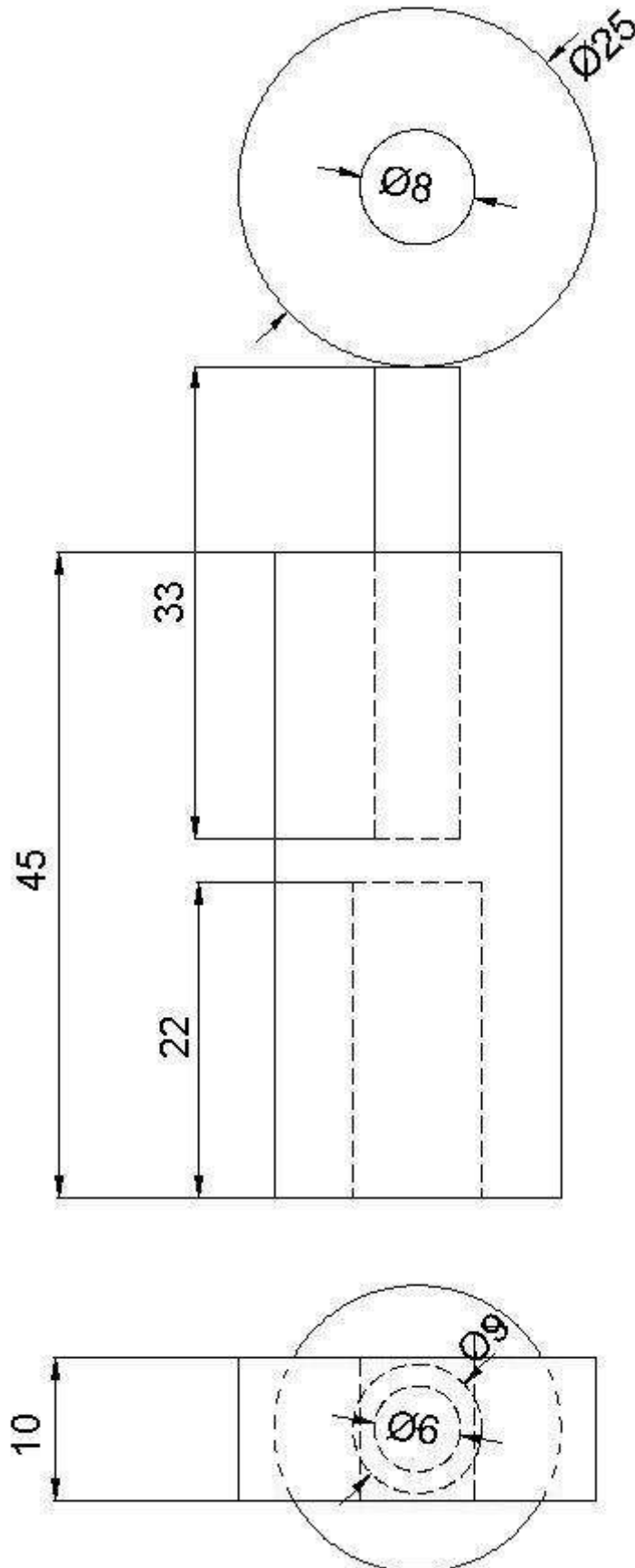
Componente 3 – Parte 2

UNIDADE

Milímetros

ESCALA

2,62 : 1



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Tubo para Alinhamento Mola-Suporte

QUANTIDADE

1 PEÇA

CÓDIGO DO DESENHO

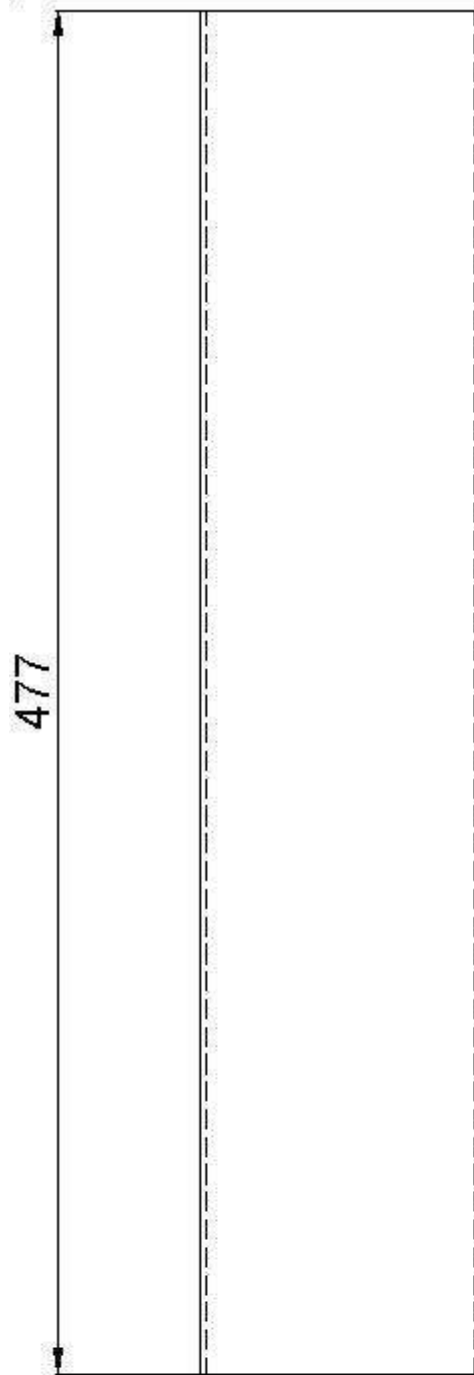
Componente 4 – Parte 1

UNIDADE

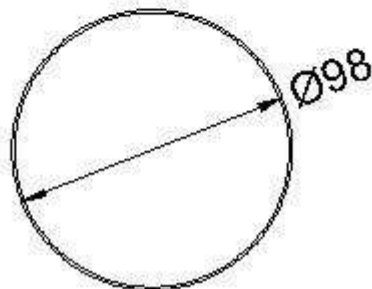
Milímetros

ESCALA

1 : 2,33



Espessura do
Tubo: 2mm



TCC

TÍTULO DO DESENHO

Suporte Interno para Posicionamento da Mola

QUANTIDADE

1 PEÇA

CÓDIGO DO DESENHO

Componente 4 – Parte 2

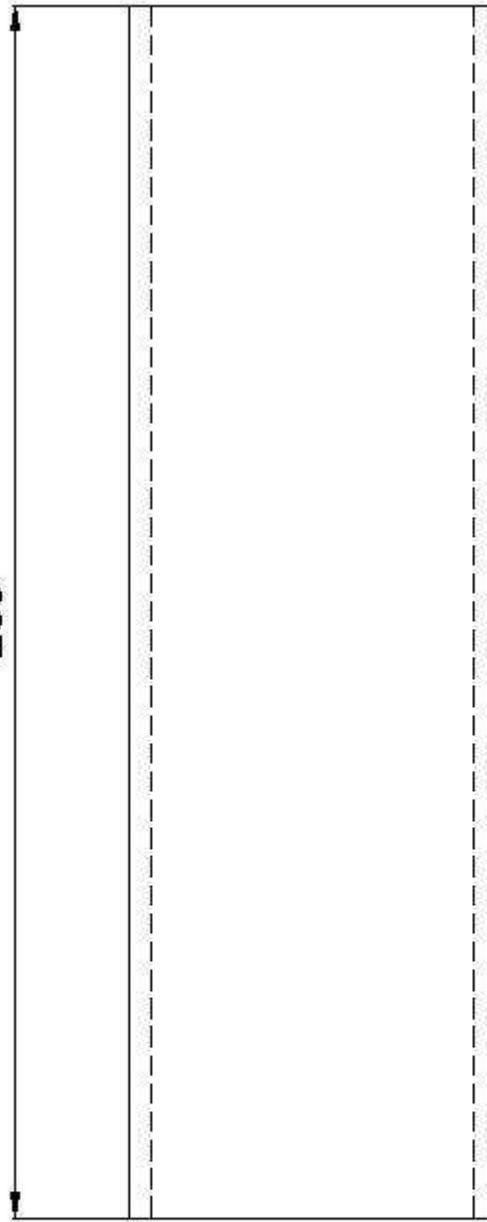
UNIDADE

Milímetros

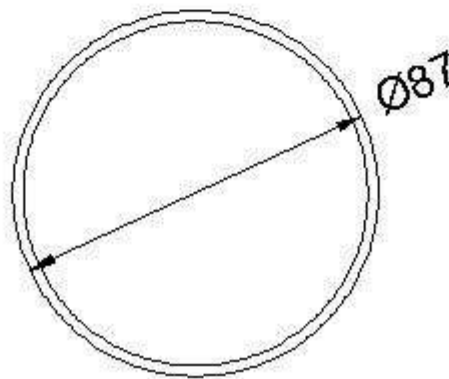
ESCALA

1 : 1,43

289



Espessura do
Tubo: 5mm



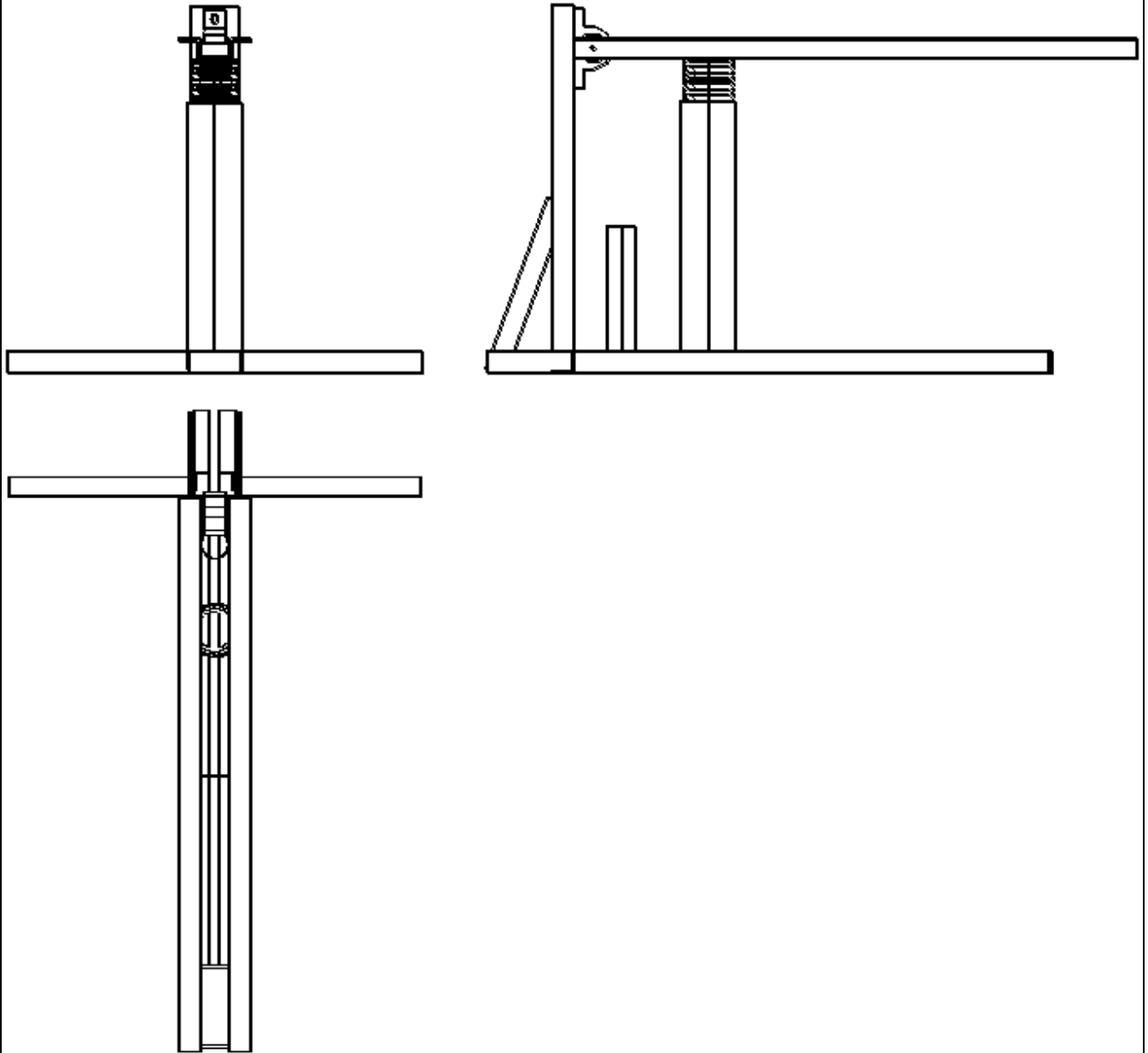
TCC

TÍTULO DO DESENHO

Equipamento Montado

CÓDIGO DO DESENHO

Equipamento Montado



ANEXO C

(Características do Acelerômetro ADXL250 da Analog Devices)



$\pm 5 g$ to $\pm 50 g$, Low Noise, Low Power, Single/Dual Axis *i*MEMS[®] Accelerometers

ADXL150/ADXL250

FEATURES

- Complete Acceleration Measurement System on a Single Monolithic IC
- 80 dB Dynamic Range
- Pin Programmable $\pm 50 g$ or $\pm 25 g$ Full Scale
- Low Noise: $1 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$ Typical
- Low Power: $< 2 \text{ mA}$ per Axis
- Supply Voltages as Low as 4 V
- 2-Pole Filter On-Chip
- Ratiometric Operation
- Complete Mechanical & Electrical Self-Test
- Dual & Single Axis Versions Available
- Surface Mount Package

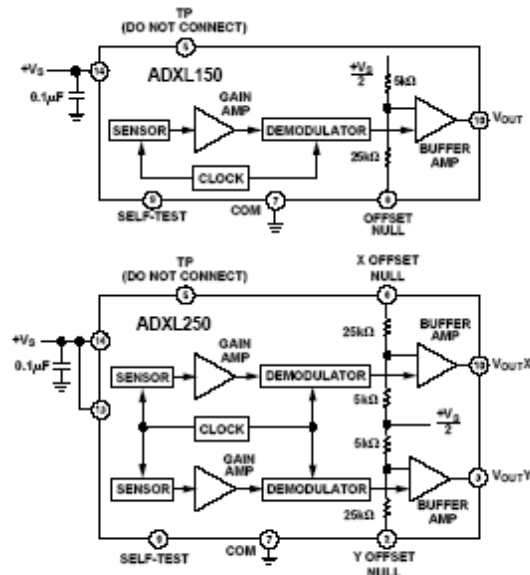
GENERAL DESCRIPTION

The ADXL150 and ADXL250 are third generation $\pm 50 g$ surface micromachined accelerometers. These improved replacements for the ADXL50 offer lower noise, wider dynamic range, reduced power consumption and improved zero g bias drift.

The ADXL150 is a single axis product; the ADXL250 is a fully integrated dual axis accelerometer with signal conditioning on a single monolithic IC, the first of its kind available on the commercial market. The two sensitive axes of the ADXL250 are orthogonal (90°) to each other. Both devices have their sensitive axes in the same plane as the silicon chip.

The ADXL150/ADXL250 offer lower noise and improved signal-to-noise ratio over the ADXL50. Typical S/N is 80 dB, allowing resolution of signals as low as 10 mg , yet still providing a $\pm 50 g$ full-scale range. Device scale factor can be increased from 38 mV/g to 76 mV/g by connecting a jumper between V_{OUT} and the offset null pin. Zero g drift has been reduced to $0.4 g$ over the industrial temperature range, a $10\times$ improvement over the ADXL50. Power consumption is a modest 1.8 mA per axis. The scale factor and zero g output level are both

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS



ratiometric to the power supply, eliminating the need for a voltage reference when driving ratiometric A/D converters such as those found in most microprocessors. A power supply bypass capacitor is the only external component needed for normal operation.

The ADXL150/ADXL250 are available in a hermetic 14-lead surface mount cerpac package specified over the 0°C to $+70^\circ\text{C}$ commercial and -40°C to $+85^\circ\text{C}$ industrial temperature ranges. Contact factory for availability of devices specified over automotive and military temperature ranges.

*i*MEMS is a registered trademark of Analog Devices, Inc.

REV. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1998

ADXL150/ADXL250—SPECIFICATIONS (T_A = +25°C for J Grade, T_A = -40°C to +85°C for A Grade, V_S = +5.00 V, Acceleration = Zero g, unless otherwise noted)

Parameter	Conditions	ADXL150JQC/AQC			ADXL250JQC/AQC			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SENSOR								
Guaranteed Full-Scale Range		±40	±50		±40	±50		g
Nonlinearity			0.2			0.2		% of FS
Package Alignment Error ¹			±1			±1		Degrees
Sensor-to-Sensor Alignment Error						±0.1		Degrees
Transverse Sensitivity ²			±2			±2		%
SENSITIVITY								
Sensitivity (Ratiometric) ³	Y Channel				33.0	38.0	43.0	mV/g
	X Channel	33.0	38.0	43.0	33.0	38.0	43.0	mV/g
Sensitivity Drift Due to Temperature	Delta from 25°C to T _{MIN} or T _{MAX}		±0.5			±0.5		%
ZERO g BIAS LEVEL								
Output Bias Voltage ⁴		V _S /2 - 0.35	V _S /2	V _S /2 + 0.35	V _S /2 - 0.35	V _S /2	V _S /2 + 0.35	V
Zero g Drift Due to Temperature	Delta from 25°C to T _{MIN} or T _{MAX}		0.2			0.3		g
ZERO-g OFFSET ADJUSTMENT								
Voltage Gain	Delta V _{OUT} /Delta V _{CS IN}	0.45	0.50	0.55	0.45	0.50	0.55	V/V
Input Impedance		20	30		20	30		kΩ
NOISE PERFORMANCE								
Noise Density ⁵			1	2.5		1	2.5	mg/√Hz
Clock Noise			5			5		mV p-p
FREQUENCY RESPONSE								
-3 dB Bandwidth		900	1000		900	1000		Hz
Bandwidth Temperature Drift	T _{MIN} to T _{MAX}		50			50		Hz
Sensor Resonant Frequency	Q = 5		24			24		kHz
SELF-TEST								
Output Change ⁶	ST Pin from Logic "0" to "1"	0.25	0.40	0.60	0.25	0.40	0.60	V
Logic "1" Voltage		V _S - 1			V _S - 1			V
Logic "0" Voltage				1.0			1.0	V
Input Resistance	To Common	30	50		30	50		kΩ
OUTPUT AMPLIFIER								
Output Voltage Swing	I _{OUT} = ±100 μA	0.25		V _S - 0.25	0.25		V _S - 0.25	V
Capacitive Load Drive		1000			1000			pF
POWER SUPPLY (V_S)⁷								
Functional Voltage Range		4.0		6.0	4.0		6.0	V
Quiescent Supply Current	ADXL150		1.8	3.0				mA
	ADXL250 (Total 2 Channels)				3.5	5.0		mA
TEMPERATURE RANGE								
Operating Range J		0		+70	0		+70	°C
Specified Performance A		-40		+85	-40		+85	°C

NOTES

¹Alignment error is specified as the angle between the true axis of sensitivity and the edge of the package.

²Transverse sensitivity is measured with an applied acceleration that is 90 degrees from the indicated axis of sensitivity.

³Ratiometric: V_{OUT} = V_S/2 + (Sensitivity × V_S/5 V × a) where a = applied acceleration in g_s, and V_S = supply voltage. See Figure 21. Output scale factor can be doubled by connecting V_{OUT} to the offset null pin.

⁴Ratiometric, proportional to V_S/2. See Figure 21.

⁵See Figure 11 and Device Bandwidth vs. Resolution section.

⁶Self-test output varies with supply voltage.

⁷When using ADXL250, both Pins 13 and 14 must be connected to the supply for the device to function.

Specifications subject to change without notice.

THEORY OF OPERATION

The ADXL150 and ADXL250 are fabricated using a proprietary surface micromachining process that has been in high volume production since 1993. The fabrication technique uses standard integrated circuit manufacturing methods enabling all the signal processing circuitry to be combined on the same chip with the sensor.

The surface micromachined sensor element is made by depositing polysilicon on a sacrificial oxide layer that is then etched away leaving the suspended sensor element. Figure 14 is a simplified view of the sensor structure. The actual sensor has 42 unit cells for sensing acceleration. The differential capacitor sensor is composed of fixed plates and moving plates attached to the beam that moves in response to acceleration. Movement of the beam changes the differential capacitance, which is measured by the on chip circuitry.

The sensor has 12-unit capacitance cells for electrostatically forcing the beam during a self-test. Self-test is activated by the user with a logic high on the self-test input pin. During a logic high, an electrostatic force acts on the beam equivalent to approximately 20% of full-scale acceleration input, and thus a proportional voltage change appears on the output pin. When activated, the self-test feature exercises both the entire mechanical structure and the electrical circuitry.

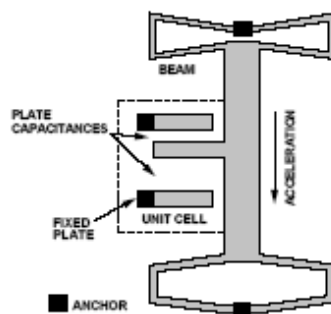


Figure 14. Simplified View of Sensor Under Acceleration

All the circuitry needed to drive the sensor and convert the capacitance change to voltage is incorporated on the chip requiring no external components except for standard power supply decoupling. Both sensitivity and the zero-g value are ratiometric to the supply voltage, so that ratiometric devices following the accelerometer (such as an ADC, etc.) will track the accelerometer if the supply voltage changes. The output voltage (V_{OUT}) is a function of both the acceleration input (a) and the power supply voltage (V_S) as follows:

$$V_{OUT} = V_S/2 - (Sensitivity \times \frac{V_S}{5V} \times a)$$

Both the ADXL150 and ADXL250 have a 2-pole Bessel switched-capacitor filter. Bessel filters, sometimes called linear phase filters, have a step response with minimal overshoot and a maximally flat group delay. The -3 dB frequency of the poles is preset at the factory to 1 kHz. These filters are also completely self-contained and buffered, requiring no external components.

MEASURING ACCELERATIONS LESS THAN 50 g

The ADXL150/ADXL250 require only a power supply bypass capacitor to measure $\pm 50 g$ accelerations. For measuring $\pm 50 g$ accelerations, the accelerometer may be directly connected to an ADC (see Figure 25). The device may also be easily modified to measure lower g signals by increasing its output scale factor.

The scale factor of an accelerometer specifies the voltage change of the output per g of applied acceleration. This should not be confused with its resolution. The resolution of the device is the lowest g level the accelerometer is capable of measuring. Resolution is principally determined by the device noise and the measurement bandwidth.

The zero g bias level is simply the dc output level of the accelerometer when it is not in motion or being acted upon by the earth's gravity.

Pin Programmable Scale Factor Option

In its normal state, the ADXL150/ADXL250's buffer amplifier provides an output scale factor of 38 mV/g, which is set by an internal voltage divider. This gives a full-scale range of $\pm 50 g$ and a nominal bandwidth of 1 kHz.

A factor-of-two increase in sensitivity can be obtained by connecting the V_{OUT} pin to the offset null pin, assuming that it is not needed for offset adjustment. This connection has the effect of reducing the internal feedback by a factor of two, doubling the buffer's gain. This increases the output scale factor to 76 mV/g and provides a $\pm 25 g$ full-scale range.

Simultaneously, connecting these two pins also increases the amount of internal post filtering, reducing the noise floor and changing the nominal 3 dB bandwidth of the ADXL150/ADXL250 to 500 Hz. Note that the post filter's "Q" will also be reduced by a factor of $\sqrt{2}$ from 0.58 (Bessel response) to a much gentler "Q" value of 0.41. The primary effect of this change in "Q" is only at frequencies within two octaves of the corner frequency; above this the two filter slopes are essentially the same. In applications where a flat response up to 500 Hz is needed, it is better to operate the device at 38 mV/g and use an external post filter. Note also that connecting V_{OUT} to the offset pin adds a 30 k Ω load from V_{OUT} to $V_S/2$. When swinging $\pm 2 V$ at V_{OUT} , this added load will consume $\pm 60 \mu A$ of the ADXL150/ADXL250's 100 μA (typical) output current drive.

ANEXO D

(Planilha em MS Excel para Elaboração das Tabelas 2 e 3)

TABELA PARA DIMENSIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

CONSTANTES

g (m/s²)	9,81
Pi	3,141592654

Considerando

d (m)	0,082	Distância do Amortecedor Até a Origem				
D (m)	0,173	Distância da Mola Até a Origem				
L (m)	0,910	Distância da Massa Até a Origem				
m (kg)	0,000	Massa Adicionada Na Extremidade do Braço Oscilante	mREAL (kg)	1,15	F_m (N)	11,28
K (N/m)	57000	Constante de Elasticidade da Mola				

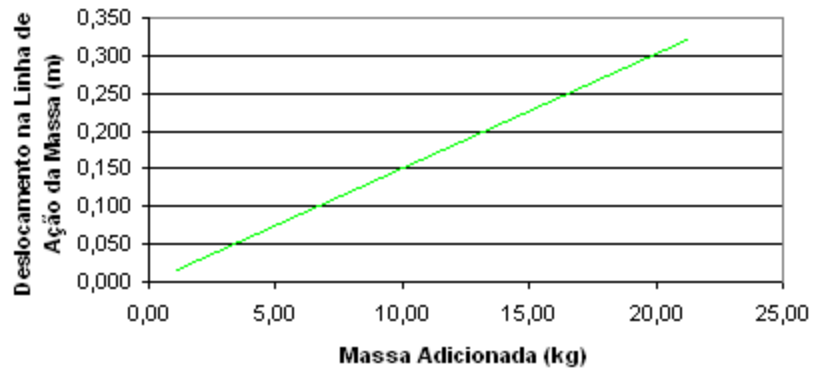
Resultados

k_{eq} (kg)	2060,08	Constante de Elasticidade Equivalente na Linha de Ação da Massa			
x' (m)	0,005	Deformação da Mola			
θ (rad)	0,032	Ângulo máximo	θ (graus)	1,81	
x'' (m)	0,029	Amplitude na Linha de Ação da Massa			
ω (rad/s)	42,32	Frequência Natural	F (Hz)	6,74	

VARIANDO A MASSA

d (m)	D (m)	L (m)	m' (kg)	m (kg)	K (N/m)	$k_{eq(\theta)}$	x' (m)	θ (rad)	x'' (m)
0,082	0,205	0,910	0,000	1,150	57000	2892,68	0,004	0,019	0,017
			2,500	3,650			0,012	0,060	0,055
			5,000	6,150			0,021	0,102	0,093
			7,500	8,650			0,029	0,143	0,130
			10,000	11,150			0,038	0,184	0,168
			12,500	13,650			0,046	0,226	0,205
			15,000	16,150			0,055	0,267	0,243
			17,500	18,650			0,063	0,309	0,281
			20,000	21,150			0,072	0,350	0,318

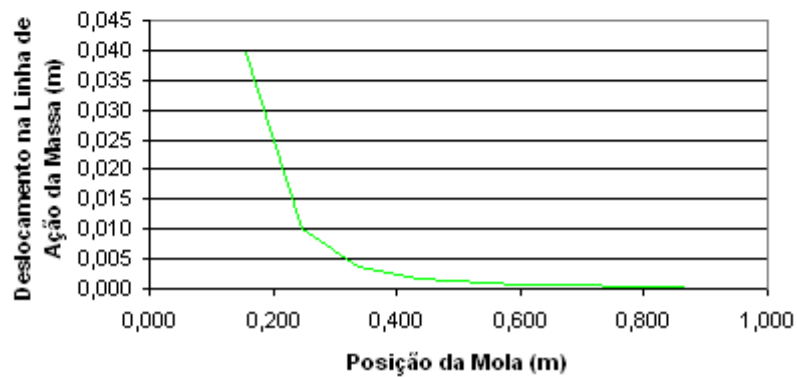
Deslocamento na Linha de Ação da Massa x Massa Adicionada



VARIANDO "D"

d (m)	D (m)	L (m)	m' (kg)	m (kg)	K (N/m)	$k_{eq}(g)$	x' (m)	θ (rad)	x'' (m)
0,082	0,156	0,910	0,000	1,150	57000	1,7E+03	0,007	0,043	0,039
	0,244					4,1E+03	0,003	0,011	0,010
	0,332					7,6E+03	0,001	0,004	0,004
	0,420					1,2E+04	0,001	0,002	0,002
	0,509					1,8E+04	0,001	0,001	0,001
	0,597					2,5E+04	0,000	0,001	0,001
	0,685					3,2E+04	0,000	0,001	0,000
	0,773					4,1E+04	0,000	0,000	0,000
	0,861					5,1E+04	0,000	0,000	0,000

Deslocamento na Linha de Ação da Massa x Posição da Mola



ANEXO E

(Planilha em MS Excel para Cálculo do Coeficiente de Amortecimento)

TABELA PARA CÁLCULO DO COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO

CONDIÇÕES INICIAIS

m (kg)	1,15	Entrar com Esse Dado
k (N/m)	5,7E+04	Dado Fixo
d (m)	0,082	Dado Fixo
D (m)	0,205	Entrar com Esse Dado
L (m)	0,910	Entrar com Esse Dado

DADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

X₀ (m/s²)	49,6	X1 (m/s²)	12,8	Obter Esse Dado
X_n (m/s²)	27,2	X2 (m/s²)	7,0	Obter Esse Dado
q (rad/s)	31,29	Obter Esse Dado		

DECREMENTO LOGARÍTMICO

δ (adimensional)	0,30	$\delta = 0,5 \cdot \text{LN}(X_0/X_n)$
-------------------------	------	---

FATOR DE AMORTECIMENTO

ζ (adimensional)	0,05	$\zeta = ((\delta^2)/(d^2 + 4 \cdot \pi^2))^{0,5}$
-------------------------	------	--

FREQUÊNCIA NATURAL

ω_n (rad/s)	31,33	$\omega = q/(1-\zeta^2)^{0,5}$
k equivalente (N/m)	2,9E+03	k equivalente = (D/L) ² · k

COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO

C equivalente (N.s/m)	3,46	C equivalente = ω · 2 · m · ζ
C (N.s/m)	4,3E+02	C = C equivalente · (L/d) ²

CONSTANTES

Pi	3,141593
g (m/s²)	9,807

ACELERÔMETRO

38 mV	1 g
0,2581 m/(s ² · mV)	