

*g (m/s)*

*(initial)  
12/03/2001*

**Tatiana Cristina Giorjão**

**PROJETO DE UM ABSORVEDOR DINÂMICO  
DE VIBRAÇÕES CONTROLADO**

**Trabalho de formatura para graduação  
em Engenharia Mecânica na Escola  
Politécnica da USP**

**Orientador: Prof. Marcílio Alves**

**São Paulo  
2002**

**Tatiana Cristina Giorjão**

**PROJETO DE UM ABSORVEDOR DINÂMICO  
DE VIBRAÇÕES CONTROLADO**

**Trabalho de formatura para graduação  
em Engenharia Mecânica na Escola  
Politécnica da USP**

**Orientador: Prof. Marcílio Alves**

**São Paulo  
2002**

Para meu Pai, Mãe e Irmã, por  
estarem sempre ao meu lado  
no aprendizado da vida.



## **Agradecimentos**

Quero agradecer ao meu namorado Eduardo Pasianot que muito tem me ajudado nesse período universitário, auxiliando-me em trabalhos escolares, sendo esse trabalho em especial, pois através de seus conhecimentos, principalmente em eletrônica, de sua dedicação e sua paciência, foi possível o meu aprendizado e a conclusão do trabalho.

Ao professor Marcílio Alves agradeço a orientação e a disponibilização do material de estudo e da sala do laboratório.

Por fim, além de dedicar esse trabalho a minha família, quero agradecê-los por tornar possível meus estudos, incentivando-me e apoiando-me em todas as escolhas que preciso fazer, mesmo estando longe.

## **Súmario**

1.Breve História da Vibração.....	1
1.1 Importância do Estudo de Vibrações.....	3
2. Introdução.....	5
2.1 Motivação.....	6
3 Descrição do Problema.....	8
4. Fundamentação Teórica.....	9
4.1 Absorvedor Dinâmico de Vibrações .....	9
4.2 Sistema de Controle .....	18
5 Estudo de Viabilidade.....	20
5.1 Viabilidade Técnica.....	20
5.2 Viabilidade Financeira.....	20
5.3 Apresentação das Possíveis Soluções.....	21
5.3.1 Solução 1.....	21
5.3.2 Solução2.....	21
5.3.3 Solução 3.....	21
5.3.4 Solução 4.....	22
6 Descrição das Possíveis Soluções.....	23
6.1 Solução 1.....	23
6.2 Solução 2.....	25
6.3 Solução 3.....	27
6.4 Solução 4.....	29

7 Escolha da Melhor Solução.....	31
8 Projeto Básico.....	33
8.1 Projeto do Conjunto.....	33
8.2 Projeto do Absorvedor Dinâmico de Vibrações.....	34
8.3 Projeto da Estrutura/Absorvedor.....	37
8.4 Controle.....	40
9 Esquema de medição de Vibração.....	42
10 Sistema de Aquisição de Dados.....	43
10.1 Placa de Aquisição e Dados.....	43
10.2 Software.....	43
10.3 Transdutor e Atuador.....	45
11 Simulação e Resultados .....	47
12 Funcionamento do Sistema Experimental.....	51
12.1 Fotos do Protótipo.....	54
12.2 Resultados Experimentais.....	56
13 Conclusão.....	59
Apêndice 1: Programa em Matlab.....	60
Apêndice 2: Programa em Matlab.....	62
Apêndice 3: Programa em Matlab.....	63
Apêndice 4: Programa em Matlab.....	64
Apêndice 5: Software Vibrações em Visual Basic 6.0.....	65
Referências Bibliográficas.....	80

## **Índice de Figuras**

1. 1 "Monochord" .....	1
4.1.1 Máquina com Absorvedor Dinâmico de Vibrações não Amortecido.....	10
4.1.2 Diagrama de Corpo Livre de Cada Massa do Sistema Anterior.....	10
4.1.3 Sistema com Oscilação de Base.....	14
4.2.1 Sistema de Controle em Malha Aberta.....	18
4.2.2 Sistema de controle em Malha Fechada.....	19
6.1.1 Local do Absorvedor Passivo TLCD.....	24
6.1.2 Detalhe do Absorvedor Passivo de Vibrações.....	25
6.2.1 Modelo da Estrutura.....	25
6.2.2 Modelo Experimental.....	26
6.2.3 Absorvedor Dinâmico de Vibrações Híbrido.....	27
6.3.1 Modelo da Estrutura.....	28
6.3.2 Funcionamento do Absorvedor Dinâmico de Vibrações Híbrido.....	28
6.3.3 Estrutura e Absorvedor Dinâmico de Vibrações.....	29
6.4.1 Estrutura e Absorvedor de Vibrações.....	30
8.1.1 Representação Esquemática do Sistema.....	33
8.2.1 Representação Esquemática do Projeto.....	34
8.2.2 Dimensões da Viga.....	37
8.3.1 Modelo 2D.....	38
8.3.2 Modelo 3D-Absorvedor Face1.....	38
8.3.3 Modelo 3D-Absorvedor Face2.....	39
8.4.1 Representação da Chave-Óptica.....	40

8.4.2 Viga com Código.....	41
9.1 Esquema Básico De Medição de Vibração.....	42
10.1 Sistema de Aquisição de Dados.....	43
10.3.1 Acelerômetro.....	46
10.3.2 Shaker.....	46
12.1 Interface do Programa.....	51
12.2 Esquema de Funcionamento.....	52
12.3 Sensor e Condicionador de Sinais.....	53
12.4 Amplificador de Sinais.....	53
12.1.1 Foto 1 do Protótipo.....	54
12.1.2 Foto 2 do Protótipo.....	55
12.1.3 Foto 3 do Protótipo.....	55

## **Índice de Gráficos**

4.1.1 Efeito do Absorvedor de Vibrações não Amortecido na Máquina.....	14
4.1.2 Deslocamento Relativo x Freqüência Relativa.....	17
11.1 $ [m]  \times w[\text{rad/s}]$ .....	47
11.2 $k[\text{N/m}] \times w[\text{rad/s}]$ .....	48
11.3 $k[\text{N/m}] \times  [m] $ .....	48
11.4 $w=10\text{rad/s}$ e $k=20\text{N/m}$ .....	49
11.5 $w=20\text{rad/s}$ e $k=80\text{N/m}$ .....	50
12.2.1 Absorvedor para 4.1Hz.....	56
12.2.2 Absorvedor para 6.6Hz.....	57
12.2.3 Sensor Óptico.....	58

## **Índice de Tabelas**

7.1. Matriz de Decisão para Absorvedor Dinâmico de Vibrações Controlado 32

## **Resumo**

Este trabalho tem como objetivo desenvolver o projeto completo (estudo, desenvolvimento e construção de protótipo) de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Controlado para estruturas (edifícios) que estão sujeitas à fenômenos naturais, como por exemplo terremotos.

Primeiramente, será feita uma introdução descrevendo os problemas de ordem vibratório e seu relacionamento com o mundo real, bem como a motivação desse trabalho, revelando os aspectos que levaram a escolha desse tema.

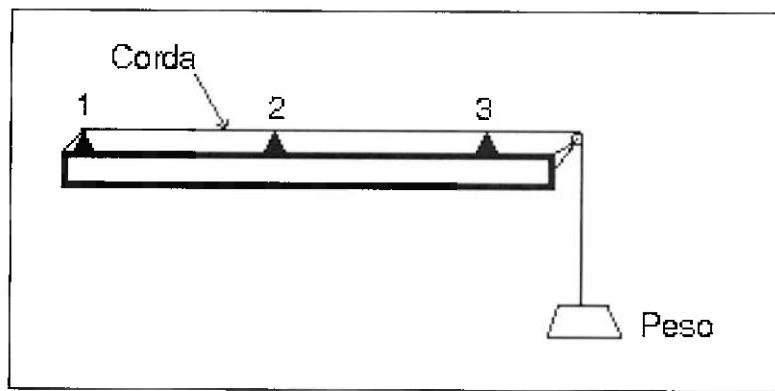
No decorrer do trabalho serão apresentadas soluções possíveis de serem implementadas para o problema descrito. Essas soluções serão descritas e analisadas segundo critérios de viabilidade, para no final ser obtida a solução que melhor atende aos requisitos pré-determinados.

Após escolhida a melhor proposta para a definição do problema serão realizados os cálculos e programas necessários para a implementação da mesma, bem como testes com o protótipo construído; verificando assim, sua eficiência.

## 1. Breve História da Vibração

O interesse em vibrações surgiu quando os primeiros instrumentos musicais foram descobertos. Desde então, os fenômenos de vibração têm sido observados e estudados mais profundamente pelos indivíduos.

O matemático e filósofo Grego Pythagoras (582-507 a.c) é considerado uma das primeiras pessoas a investigar sons musicais com bases científicas. Entre outras coisas, Pythagoras conduziu experimentos onde uma corda de vibração era utilizada em um dispositivo chamado “monochord” (Figura 1.1). O “monochord” possuia duas pontes fixas (1e3) e uma móvel (2), enquanto a tensão da corda era mantida constante através de um peso pendurado na extremidade. Pythagoras observou que se os dois lados da corda de diferente comprimento estivessem sujeitos a mesma tensão, o lado de menor comprimento emitiria uma nota mais aguda, e ainda, se o comprimento da corda menor, fosse metade do comprimento da maior, o pedaço menor emitiria uma nota uma oitava acima da outra. Apesar do conceito de comprimento ter sido desenvolvido no tempo de Pythagoras, a relação com a frequência de vibração do som não foi compreendida. Na realidade essa relação não foi entendida até a época de Galileu no século XVI.



*Figura 1.1: “Monochord”.*

À tempos atrás, a China passou por várias experiências com terremotos, assim Zhang Heng, que era um historiador e astrônomo do século II, sentiu a

necessidade de se desenvolver um instrumento preciso de medição de terremotos. Em 132 d.c, ele inventou o primeiro sismógrafo do mundo para medir terremoto. Esse sismógrafo era feito de um fino molde de bronze, com um diâmetro de 1,896 metros e era parecido com um jarro de vinho. Dentro desse jarro havia um mecanismo que consistia de um pêndulo rodeado por um grupo de oito mecanismos de alavanca apontando para oito direções.

Galileu Galilei (1564-1642) é considerado o fundador da ciência experimental moderna. Ele foi inspirado a estudar o comportamento de um pêndulo observando a movimentação pendular de uma lâmpada em uma igreja em Pisa. Ele começou a medir o período do pêndulo com seu pulso e encontrou que o período era independente da amplitude do balanço. A dependência da frequência de vibração no comprimento de um pêndulo simples foi descoberto juntamente com o fenômeno de ressonância. Galileu também indicou que havia encontrado a relação entre a frequência, comprimento, tensão e densidade de uma vibração em uma corda tensionada, entretanto, o primeiro a publicar corretamente esse assunto foi o matemático e teólogo Francês Marin Mersenne (1588-1648).

Robert Hooke (1635-1703) também conduziu alguns experimentos para encontrar a relação entre o comprimento e a frequência de vibração de uma corda. Entretanto foi Joseph Sauveur (1653-1716) que investigou estes experimentos inteiramente e inventou o termo “acústica”, para denominar a ciência que estuda o som. Sauver na França e John Wallis (1616-1703) na Inglaterra, observaram independentemente, o fenômeno dos modos de vibrar.

Em 1877 Lord Baron Rayleigh publicou seu livro sobre sons, sendo este último considerado um clássico mesmo nos dias atuais. Nesse livro ele ensina um método para encontrar frequência natural de vibração de um sistema conservativo fazendo uso do princípio de conservação de energia.

Mais recentemente em 1902 Frahm verificou a importância de se estudar vibração torcional dos cabos das hélices de navios. Além disso, em 1909 Frahm propôs o conceito de absorvedor dinâmico de vibrações.

Stephen Timoshenko (1878-1972) apresentou e melhorou a teoria de vibrações em vigas.

Além desses cientistas citados acima, muitos outros contribuíram e ainda contribuem, de alguma forma, para a compreensão desses fenômenos vibratórios. No entanto, somente nos últimos anos com a utilização de avançados computadores com softwares de simulação computacional, os modelos, estudados pelos cientistas, puderam ser mais detalhados e aperfeiçoados de maneira a representar mais fielmente a realidade.

## 1.1 Importância do Estudo de Vibrações

A vibração é um fenômeno que está presente em muitas atividades dos seres humanos. Pode-se citar como exemplo a respiração, que está associada a vibração dos pulmões, o andar e correr que envolve o movimento oscilatório das pernas e braços, a fala que é resultado da vibração das cordas vocais e o movimento oscilatório da língua, a audição que é devido à vibração do tímpano e a visão dada pela oscilação da luz que incide nos olhos.

Além disso, a vibração também é utilizada pelos indivíduos em aplicações científicas, simulando fenômenos naturais(terremotos); em máquinas de lavar; em máquinas usadas em processos industriais (ex: rebarbeiras) e outras.

No entanto, apesar do fenômeno de vibrações ter inúmeras utilidades importantes para os seres vivos, há situações em que o acontecimento desse fenômeno não é bem vindo. Assim, a vibração deve ser considerada para o desenvolvimento de projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle. Como exemplo de problemas causados pela vibração, pode-se citar rodas de locomotivas que aumentam mais de um centímetro fora do trilho, para altas velocidades, devido ao desbalanceamento; em turbinas, a vibração causa fraturas mecânicas como quebra das pás e disco da turbina; abalos sísmicos podem danificar estruturas, ou mesmo, derrubá-las.

Esses exemplos citados anteriormente podem ser agravados quando a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincide com a

frequência da excitação externa. Quando isso acontece, ocorre um fenômeno chamado de ressonância, que induz uma deflexão excessiva e a fratura, agravando os danos causados pela vibração.

Portanto, a vibração é um fenômeno que não pode ser ignorado, pois está presente em diversas situações, e deve ser estudado de maneira responsável para tentar conhecê-lo cada vez mais, usufruindo assim, do que ele tem de interessante e o controlando em ocasiões em que é prejudicial.

## 2. Introdução

O grande desenvolvimento da mecânica teórica nos séculos XVIII e XIX deram a teoria de vibração raízes sólidas e profundas. No entanto, apenas no século XX, com a introdução do computador, as ciências teóricas tiveram a possibilidade de serem comprovadas através da realização de experimentos numéricos complexos, revelando novos fenômenos e inesperados resultados.

Problemas com vibrações de máquinas e estruturas são resultados de imperfeições associadas ao projeto, onde análises dinâmicas devem ser realizadas, simulando as situações possíveis de ocorrer no mundo real. Porém, em certas situações, o modelo desenvolvido não atende completamente as necessidades reais, seja pela falha do modelo, ou pela complexidade matemática. Assim, máquinas e estruturas construídas e excitadas pelas forças externas indesejáveis, devem possuir outros sistemas de absorção dessas vibrações, impedindo a destruição dessas máquinas e estruturas, ou até mesmo o desconforto causado pela excitação.

As máquinas e estruturas podem estar sujeitas a condições de carga estática, quase-estática ou dinâmica. A carga estática é caracterizada como sendo uma força que é aplicada no sistema (máquina ou estrutura) por toda sua vida, ou parte dela e também por cargas que são aplicadas com valores constantes por um determinado período. Assim a análise estrutural limita-se a determinar se ocorre fadiga do sistema ou se as tensões não causam problemas de ruptura ou deformação do sistema. A carga quase-estática possui condições semelhantes a estática, porém as cargas aplicadas possuem valores mais ou menos constantes, sendo importante uma análise de fadiga do sistema. As condições de carga dinâmica são aquelas nas quais as cargas variam rapidamente e com valores inconstantes, causando poderosos efeitos dinâmicos. A diferença reside principalmente na velocidade de variação das cargas, sendo que essas cargas dinâmicas são responsáveis pela vibração e, algumas vezes, ressonância do sistema.

As causas de ocorrerem cargas dinâmicas podem estar relacionadas aos seguintes fatores: aos movimentos das bases de sustentação das estruturas, causado pelos fenômenos naturais, como por exemplo: sísmicos; devido à movimentação de veículos pesados; devido ao próprio funcionamento do sistema, no caso das máquinas.

Sendo assim, para tentar solucionar esses problemas de vibrações causados pelas cargas dinâmicas sem que seja necessário alterar as características dinâmicas da estrutura (ou máquina) ou o ambiente de instalação são utilizados os chamados absorvedores dinâmicos de vibrações que podem ou não serem controlados pelo computador.

Assim, para começar o estudo do assunto, será apresentada uma motivação seguida de uma descrição do projeto. A seguir, será apresentada uma fundamentação teórica sobre vibrações e controle, necessárias para o seu entendimento posterior. Através de técnicas de desenvolvimento de projeto, estudar-se-á a sua viabilidade, bem como a apresentação de várias possíveis soluções para o mesmo caso descrito. Assim é realizada uma escolha de solução otimizada para a aplicação desejada. Após concluído o processo de escolha da solução, a mesma será detalhada e construída. Finalmente, os testes compreenderão duas fases: simulação computacional e física, podendo-se assim verificar sua dinâmica e eficiência.

## 2.1 Motivação

As grandes cidades estão cada vez mais construindo estruturas (edifícios) com arquiteturas arrojadas e tamanhos nunca antes visto. Assim com o surgimento desses edifícios de grande altura ("arranha céus"), estes estão expostos à forças externas indesejáveis, como exemplo: abalos sísmicos (terremotos) e ventos que podem criar desconforto às pessoas, que neles estão, ou mesmo sua destruição.

Para tentar amenizar os efeitos de vibrações sobre esses edifícios, pode-se utilizar um absorvedor dinâmico de vibrações que será estudado nos itens

abaixo. Além disso, é muito importante que esse absorvedor dinâmico seja controlado para atuar em uma faixa de frequência de vibração e não apenas em uma frequência em específico.

Assim, com o advento de novas tecnologias de simulação e controle, grandes e complexos edifícios podem ser projetados com a segurança de que essas estruturas estão equipadas com sistemas que absorvem possíveis e inesperadas excitações .

### **3. Descrição do Problema**

Como escrito anteriormente, com a evolução da tecnologia, novos e mais ousados projetos sobre edifícios e torres são propostos e aprovados. Isso gera a necessidade de se estudar o fenômeno de vibração nas condições críticas.

Assim, esse trabalho analisa e simula a situação em que um edifício é exposto a vibrações indesejadas causadas por terremotos, isto é, deslocamentos da base, através do projeto e construção de um modelo. Com os dados da estrutura (edifício) será projetado e construído um absorvedor dinâmico de vibrações controlado que reduzirá ou até mesmo eliminará os efeitos da excitação pela qual a base está sendo submetida.

## 4. Fundamentação Teórica

Esse item de fundamentação teórica será composto de dois sub-itens onde serão introduzidos conceitos de absorvedor dinâmico de vibrações(item 4.1) e sistema de controle(4.2), para facilitar o entendimento dos dois assuntos. Posteriormente, no item de detalhamento da solução, esses conceitos serão recuperados e adaptados para a solução escolhida.

### 4.1 Absorvedor Dinâmico de Vibração

Uma máquina, estrutura ou sistema quando é excitado por uma frequência de vibração que coincide com sua frequência natural ocorre, como escrito anteriormente, um fenômeno chamado de ressonância. Nesses casos o que pode-se ser feito é alterar as características de projeto do sistema, como sua massa e rigidez. No entanto na maioria das situações não é conveniente, seja por motivos financeiros ou construtivos, mexer nessas características. Assim, para reduzir ou neutralizar essa vibração indesejada, coloca-se um outro sistema com massa e rigidez(mola) para resolver o problema, esse novo sistema massa/mola é chamado de absorvedor dinâmico de vibrações.

O absorvedor dinâmico de vibrações é calculado a partir da vibração que se deseja eliminar, isto é, ele será um sistema com uma massa e uma mola que deverá vibrar exatamente na frequência prejudicial para o sistema principal (máquina ou estrutura), assim ele estará neutralizando a vibração do sistema principal.

Abaixo, será ilustrado um sistema constituído por uma máquina e seu absorvedor dinâmico de vibrações:

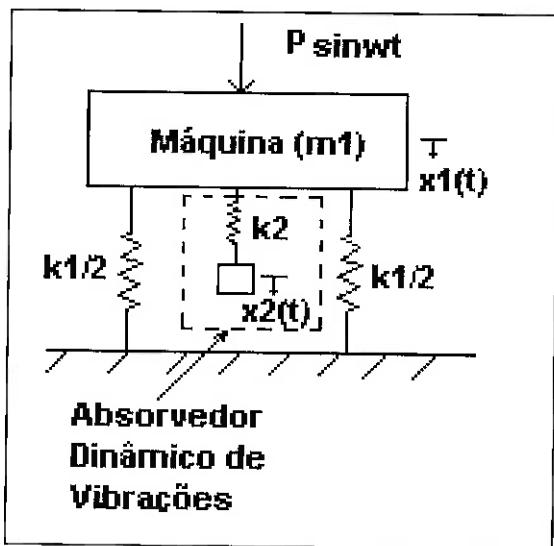


Figura 4.1.1: Máquina com Absorvedor Dinâmico de Vibrações não Amortecido.

A partir do modelo acima, pode-se montar o diagrama de corpo livre de cada massa do sistema e as equações de movimento, como visto a seguir:

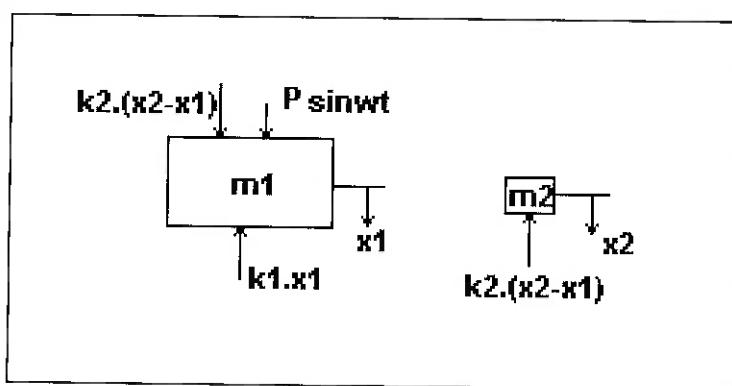


Figura 4.1.2: Diagrama de Corpo Livre de cada Massa do Sistema anterior.

Assim as equações podem ser escritas da seguinte maneira:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = P \sin \omega t \quad (4.1.1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (4.1.2)$$

Considerando uma solução harmônica:

$$x_j(t) = X_j \sin \omega t \quad , \quad j = 1, 2 \quad (4.1.3)$$

Pode-se obter as amplitudes das massas  $m_1$  e  $m_2$ :

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2 \omega^2)P}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (4.1.4)$$

$$X_2 = \frac{k_2 P}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (4.1.5)$$

Através das equações acima, pode-se verificar que para reduzir a amplitude de vibração da máquina de massa  $m_1$ , o numerador da equação 4.1.4 deverá ser igual a zero. Assim, tem-se:

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (4.1.6)$$

Se a máquina, antes da adição do absorvedor dinâmico de vibrações, operar perto da ressonância,  $\omega_2 = \omega_1 = k_1/m_1$ . Portanto, se o absorvedor é projetado tal que:

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \quad (4.1.7)$$

Assim, a amplitude de vibração da máquina quando operando com a frequência de ressonância, deverá ser zero. Pela definição:

$$\delta_{st} = \frac{P}{k_1} \quad \text{e} \quad \omega_1 = \left( \frac{k_1}{m_1} \right)^{1/2} \quad (4.1.8)$$

como frequência natural da máquina ou principal do sistema, e

$$\omega_2 = \left( \frac{k_2}{m_2} \right)^{1/2} \quad (4.1.9)$$

como a frequência do absorvedor ou sistema auxiliar. Das equações (4.1.4) e (4.1.5), pode-se escrever:

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_2} \right)^2}{\left[ 1 + \frac{k_2}{k_1} - \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (4.1.10)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{k_2}{k_1} - \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (4.1.11)$$

A Figura 4.1.3 abaixo, mostra a variação da amplitude de vibração da máquina( $X_1/\delta_{st}$ ) pela velocidade da máquina( $\omega/\omega_1$ ). Os dois picos correspondem às duas frequências naturais do sistema composto. Como visto anteriormente,  $X_1=0$  para  $\omega = \omega_1$ . Pela equação (4.1.11):

$$X_2 = -\frac{k_1}{k_2} \delta_{st} = -\frac{P}{k_2} \quad (4.1.12)$$

Isto mostra que a força exercida pela massa auxiliar é oposta a força inicial ( $k_2 X_2 = -P$ ) e a neutraliza. Portanto reduz a amplitude  $X_1$  a zero. Assim, as características do absorvedor dinâmico podem ser encontradas utilizando as equações (4.1.6) e (4.1.12):

$$k_2 X_2 = m_2 \omega^2 X_2 = -P \quad (4.1.13)$$

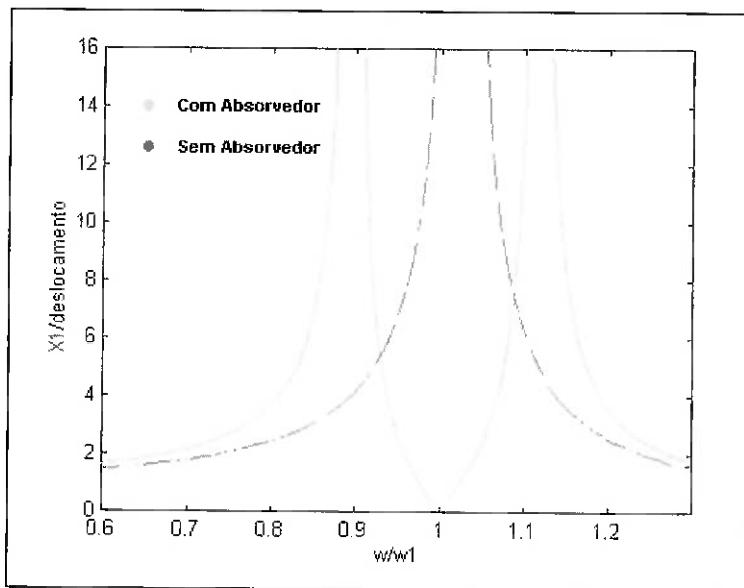


Gráfico 4.1.1: Efeito do Absorvedor de Vibrações não Amortecido na Máquina.

No caso específico desse projeto, pode-se verificar que a base onde a estrutura se encontra não é fixa como no exemplo acima, isto é o deslocamento da base que resultará na força de excitação do sistema, como pode ser visto na figura 4.1.3. Assim as equações do sistema sem o absorvedor devem ser escritas da seguinte maneira:

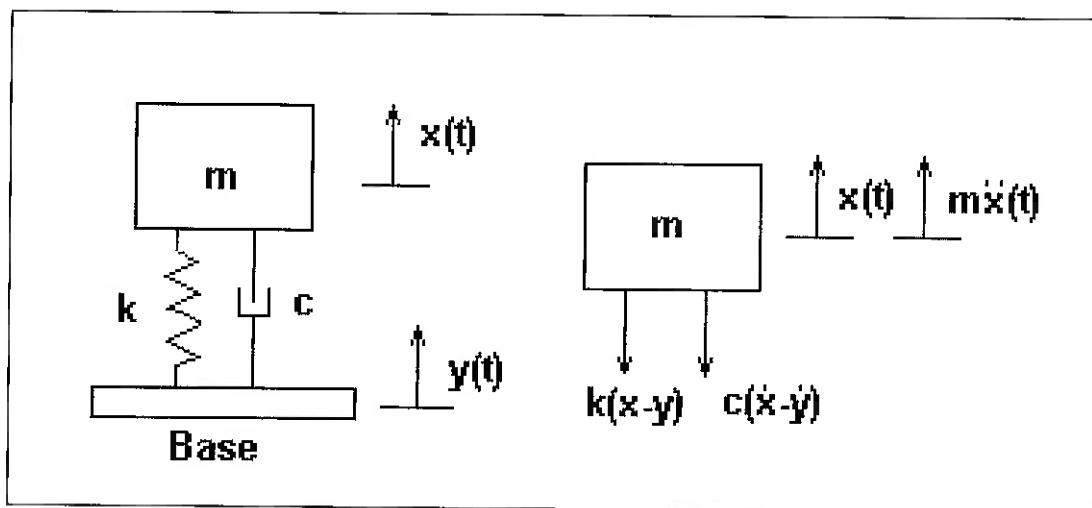


Figura 4.13: Sistema com Oscilação da Base.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (4.1.14)$$

Para o problema de excitação de base, assume-se que a base movimenta-se harmonicamente através da equação:

$$y(t) = Y \sin \omega_b t \quad (4.1.15)$$

Onde  $Y$  denota amplitude do movimento da base e  $\omega_b$  representa a frequência de oscilação da base. Substituindo a equação (4.1.15) na equação de movimento (4.1.14), tem-se:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cY\omega_b \cos \omega_b t + kY\sin \omega_b t \quad (4.1.16)$$

Para achar a solução da equação acima, deve-se somar duas soluções particulares, sendo a primeira delas  $x_p^{(1)}$  dada pelo termo  $cY\omega_b \cos \omega_b t$  e  $x_p^{(2)}$  dada pelo termo  $kY\sin \omega_b t$ .

Assim, dividindo a equação (4.1.16) por  $m$  e usando a definição de raio de amortecimento e frequência natural, tem-se:

$$\zeta = \frac{c}{2mw} \quad (4.1.17)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1.18)$$

$$x + 2\zeta\omega x + \omega^2 x = 2\zeta\omega\omega_b Y \cos \omega_b t + \omega^2 Y \sin \omega_b t \quad (4.1.19)$$

Assim, a solução particular  $x_p^{(1)}$  é dada por:

$$x_p^{(1)} = \frac{2\zeta w w_b Y}{\sqrt{(w^2 - w_b^2)^2 + (2\zeta w w_b)^2}} \cos(w_b t - \phi_1) \quad (4.1.20)$$

Para achar a segunda solução, utiliza-se de um método para resolver equações diferenciais chamado de Método de Coeficientes Indeterminados, assim:

$$x_p^{(2)} = \frac{w^2 Y}{\sqrt{(w^2 - w_b^2)^2 + (2\zeta w w_b)^2}} \sin(w_b t - \phi_1) \quad (4.1.21)$$

Onde:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{2\zeta w w_b}{w^2 - w_b^2} \quad (4.1.22)$$

Assim, a solução  $x_p(t) = x_p^{(1)} + x_p^{(2)}$  pode ser escrita da seguinte forma:

$$x_p(t) = w Y \left[ \frac{w^2 + (2\zeta w_b)^2}{(w^2 - w_b^2)^2 + (2\zeta w w_b)^2} \right]^{1/2} \cos(w_b t - \phi_1 - \phi_2) \quad (4.1.23)$$

Onde:

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{w}{2\zeta w_b} \quad (4.1.24)$$

Chamando de raio de convergência  $r = w_b/w$ , tem-se:

$$\frac{X}{Y} = \left[ \frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (4.1.25)$$

Essa equação expressa a taxa de magnitude máxima de resposta para uma entrada de deslocamento. Essa taxa é chamada de Deslocamento de Transmissibilidade e é utilizada para descrever como o movimento é transmitido da base para a massa como função de  $r = w_b/w$ . Através da figura abaixo, pode-se notar que quando essa taxa está próximo de  $r = w_b/w = 1$ , ou ressonância, a máxima quantidade de movimento é transferida para o deslocamento da massa sendo  $\tau=0.026$  (gráfico amarelo). Assim, a função do absorvedor é criar uma situação em que essa massa (principal) não sofra deslocamento, isto é, a única massa que deverá sofrer deslocamento será a massa do próprio absorvedor (massa secundária).

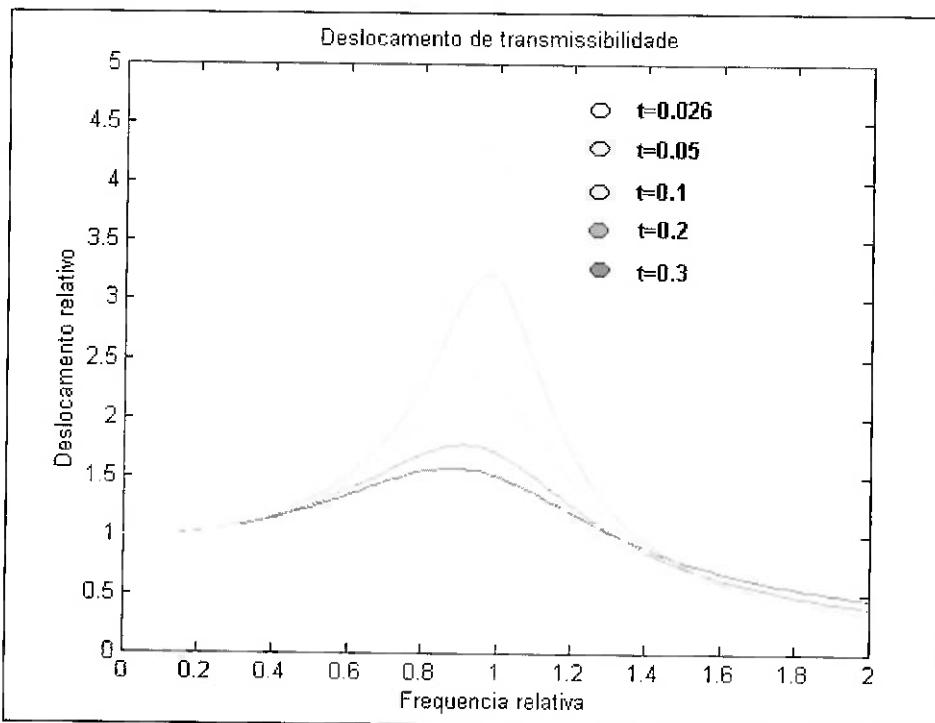


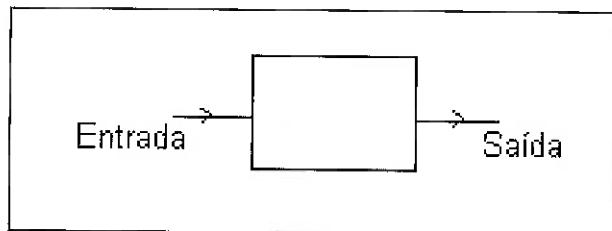
Gráfico 4.1.2: Deslocamento Relativo x Freqüência Relativa.

## 4.2 Sistema de Controle

Um sistema pode ser visto como algo onde somente o conhecimento da saída e da entrada são de interesse. Assim um sistema de controle ocorre quando uma saída é controlada para assumir um valor particular ou seguir uma determinada entrada.

Existem duas formas básicas se sistemas de controle : sistemas de controle em malha aberta e sistemas de controle em malha fechada.

No sistema de controle em malha aberta, a entrada é escolhida com base na experiência, de tal forma que o sistema apresente o valor de saída desejado., sendo que essa saída não pode ser modificada de forma a seguir as alterações nas condições de operação. A figura abaixo representa um sistema em malha aberta:



*Figura 4.2.1: sistema de controle em malha aberta*

No sistema de controle em malha fechada, um sinal é realimentado da saída para entrada e utilizado para modificar a entrada, de tal maneira que a saída seja mantida constante mesmo com modificações de operação. Abaixo está ilustrado um esquema em malha fechada:

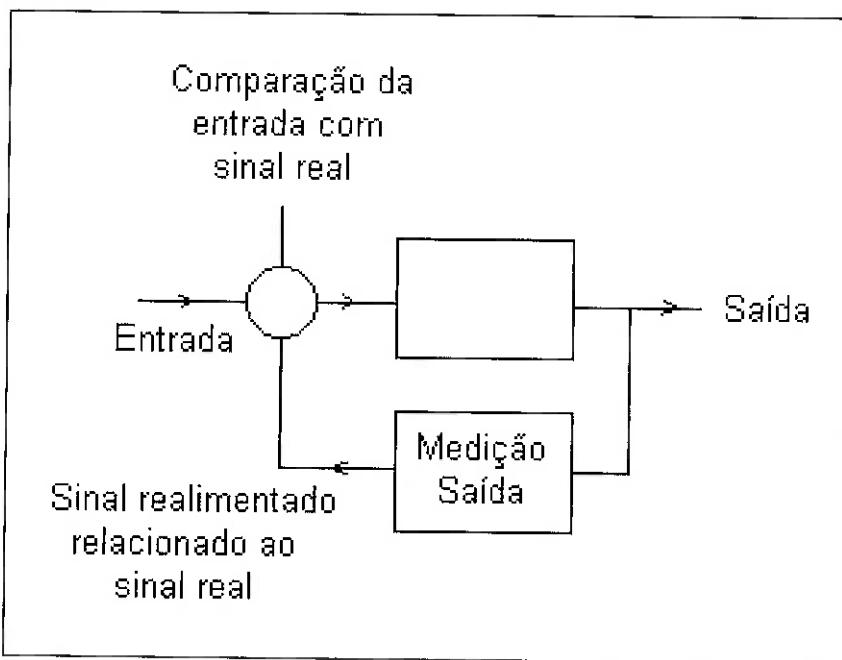


Figura 4.2.2: sistema de controle em malha fechada

Neste trabalho foram utilizados os dois sistemas de controle descritos acima, isto é um sistema em malha aberta par calcular a posição da estrutura, e um sistema em malha fechada para controlar o posicionamento do sistema massa + mola + estrutura, isto é movimentá-lo até a posição definida pelos valores calculados.

## 5. Estudo de Viabilidade

Nesse item, será realizado um estudo de viabilidade que é indispensável para escolher de maneira adequada a melhor solução para ser utilizada em um determinado projeto.

Esse estudo de viabilidade compreende os itens: viabilidade técnica, viabilidade financeira e apresentação das soluções. Abaixo esses itens serão descritos com mais detalhes permitindo a visualização e compreensão do problema.

### 5.1 Viabilidade Técnica

A utilização do absorvedor dinâmico de vibrações controlado para minimizar ou resolver problemas causados por terremotos nos edifícios é viável sob o ponto de vista técnico, à medida que se consegue mudar o modo de vibrar da estrutura sem que seja necessário alterar parâmetros construtivos da mesma.

Dentre os absorvedores dinâmicos de vibrações, há vários tipos. Exemplos: absorvedores passivos; absorvedores ativos; absorvedores híbridos. Além disso, o controle pode ser feito através de um software ou da teoria de controle, utilizando funções de transferência. Sendo assim, o problema deve ser analisado com a apresentação de várias soluções, para posteriormente ser escolhida a melhor, através de um matriz de decisão.

### 5.2 Viabilidade Financeira

Em uma situação real onde edifícios estão expostos aos vários problemas acima descritos, podendo causar desastres, o estudo de viabilidade financeira tem sua importância, no entanto não é decisiva para a definição final da solução, à medida que envolve situações de segurança das pessoas.

Porém, o objetivo desse projeto permite que se construa um modelo representativo de um absorvedor dinâmico de vibrações controlado, para ser

utilizado em experiências de laboratório. Assim, o projeto permite que o aspecto financeiro tenha importante relevância, à medida que os recursos disponíveis são limitados. Na matriz de decisão esses recursos serão considerados para escolha da melhor solução.

### **5.3 Apresentação de Possíveis Soluções**

Nos sub itens abaixo, algumas possíveis soluções serão apresentadas, porém tanto o detalhamento e a discussão de viabilidades, quanto escolha da melhor solução serão discutidas em itens posteriores.

#### **5.3.1 Solução 1**

Essa solução utiliza um absorvedor de vibrações passivo , onde um líquido que se encontra num tubo em formato U será controlado, amortecendo a estrutura e evitando os efeitos da vibração de acordo com a frequência de excitação.

#### **5.3.2 Solução 2**

Essa solução utiliza um absorvedor dinâmico de vibrações híbrido, onde uma massa será movimentada através de um campo magnético, que será induzido numa bobina, eliminando os efeitos da vibração causada pelo terremoto.

#### **5.3.3 Solução 3**

Essa solução utiliza um absorvedor dinâmico de vibrações controlado, onde uma massa irá se movimentar ao longo de uma estrutura. À medida que a freqüência muda, a massa assumirá uma posição calculada na estrutura amenizando ou eliminando os efeitos da vibração.

### 5.3.4 Solução 4

O absorvedor dinâmico de vibrações utilizado nessa solução, assim como o da solução 3, possui uma massa e uma viga(mola) que irá se mover de acordo com uma posição devidamente calculada, porém nesse caso é o conjunto massa+mola que se deslocará , ao contrário da solução anterior a qual só a massa irá se mover.

## 6. Descrição das Possíveis Soluções

Através do item anterior foi possível ter uma noção de como se apresentam as propostas de solução, mas somente nesse item onde as soluções serão detalhadas e analisadas mais profundamente, utilizando-se de esquemas e desenhos de funcionamento, é que será possível visualizar de forma clara e adequada as soluções.

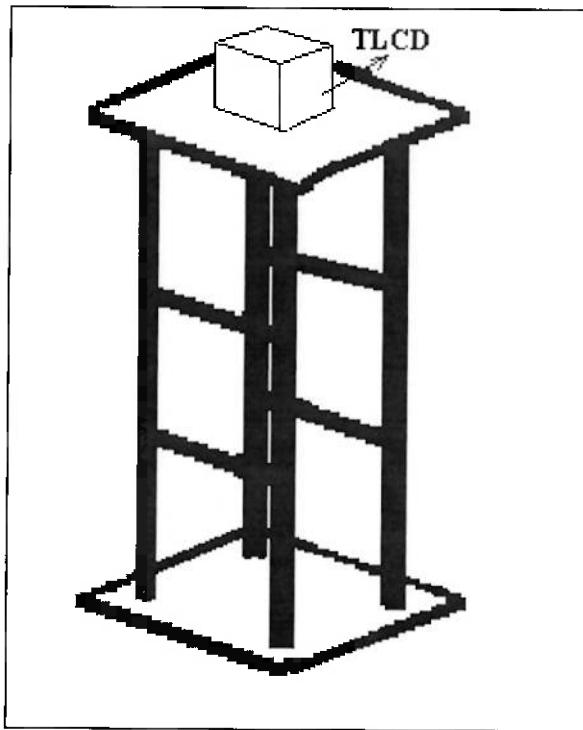
### 6.1 Solução 1

Essa solução apresenta um absorvedor passivo de vibrações utilizando amortecimento através da movimentação de uma coluna de água. Esse absorvedor é chamado de TLCD (Tuned Liquid Column Damper), tendo se mostrado eficiente na redução de vibrações. Os TLCDs consistem de uma quantidade de líquido que está acumulada dentro de um sistema rígido e com seção transversal variável ou constante. A energia é transferida da estrutura principal para o TLCD, assim o líquido irá se mover no recipiente a partir dos movimentos que ocorrerem com a estrutura principal a qual ele está fixado. A faixa de freqüências que esse absorvedor pode atender é limitada, devido às forças de restituição gravitacional que irão atuar sobre o líquido, assim esse absorvedor funciona somente para baixas freqüências de oscilação da estrutura principal.

Esse absorvedor além de reduzir a vibração na estrutura principal e melhorar o desconforto causado pelos movimentos, ele tem uma vantagem de ter um custo relativamente baixo, além de ser de fácil manutenção e manuseio. No entanto, para o bom andamento do projeto, deve-se colocar esses aspectos na matriz de decisão para realizar a comparação com as outras soluções. Abaixo, está representado um desenho do que seria um convencional TLCD e o local em que ele é colocado (Figura 6.1.1).

O TLCD consiste em dois tubos rígidos, um horizontal e dois inclinados, sendo que esses tubos estão preenchidos parcialmente com um líquido, podendo ser água. Desse modo como mostrado na figura 6.1.2, forma-se uma coluna de

água. Os tubos estão fechados e vedados para impedir o vazamento do líquido quando em movimento. A partir do instante em que a estrutura entra em deslocamento horizontal, essa coluna de água tentará se acomodar nesse tubo, absorvendo assim as vibrações.



*Figura 6.1.1: Local do Absorvedor Passivo TLCD*

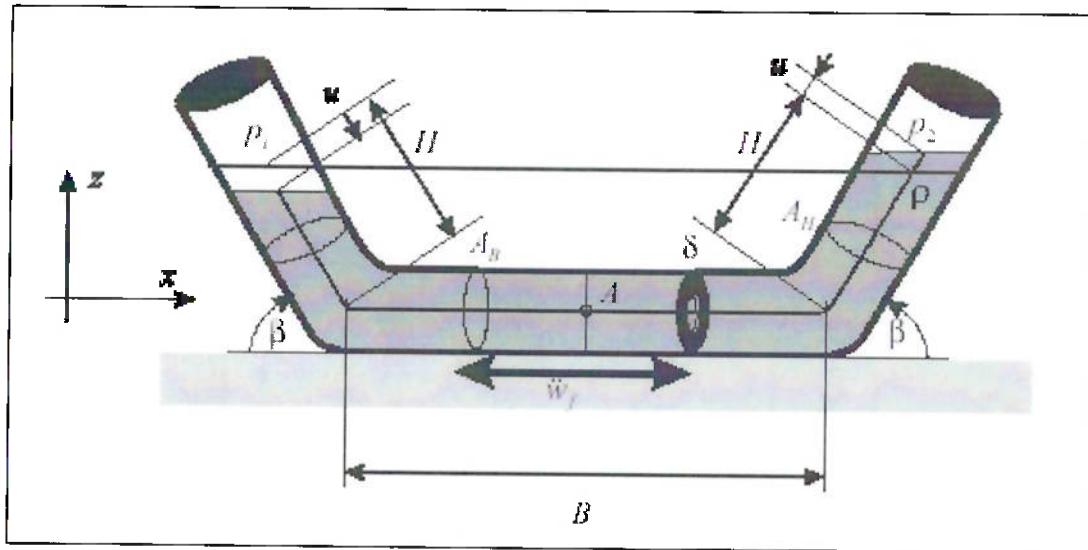


Figura 6.1.2: Detalhe do Absorvedor Passivo de Vibrações.

## 6.2 Solução 2

Na figura 6.2.1 está ilustrado o modelo da estrutura que será utilizada nessa solução e, na figura 6.2.2, como serão coletados os dados da estrutura:

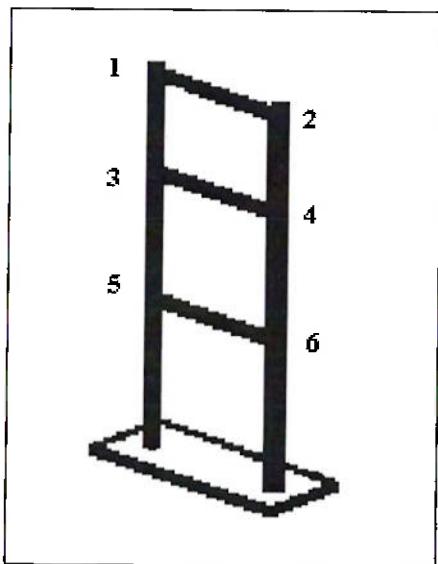
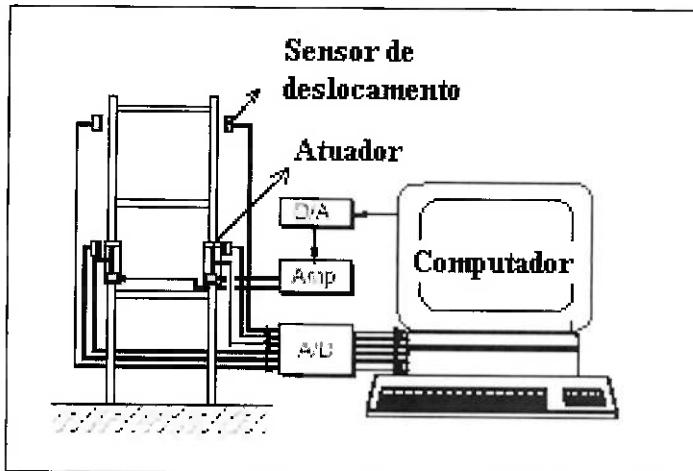
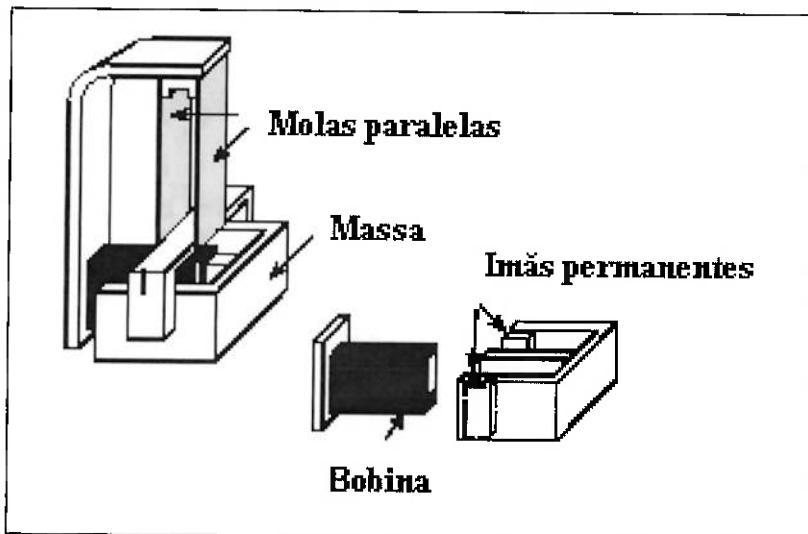


Figura 6.2.1: Modelo da Estrutura



*Figura 6.2.2: Modelo Experimental*

Nessa solução como visto acima serão utilizados quatro sensores de deslocamentos colocados nas posições de 1 a 4 da estrutura ilustrada na figura 6.2.1. Esses sensores ao detectar o deslocamento da estrutura, enviarão um sinal para o computador, através do conversor A/D(analógico/digital). Dois absorvedores dinâmicos de vibrações, que serão detalhados mais abaixo, serão colocados na posição de massa 3 e 6 da figura 6.2.1. Os extensômetros (strain gauges) quantificarão os deslocamentos dos absorvedores. Os sinais captados serão enviados para o computador que através de um software calcula como o atuador deve se comportar. O resultado disso é enviado através de um sinal, que é convertido de digital para analógico (conversor D/A), para o absorvedor que se movimentará adequadamente para atender as freqüências de oscilação do sistema. Na figura abaixo, pode-se verificar que a massa se move na horizontal à medida que o controle da corrente que passa pela bobina do absorvedor é feito, sendo assim as molas paralelas tem função de sustentar a massa que funcionará como um pêndulo, como segue:



*Figura 6.2.3: Absorvedor Dinâmico de Vibrações Híbrido.*

### 6.3 Solução 3

Essa solução é composta por um modelo de estrutura, representada por uma viga (figura 6.3.1), na qual uma massa móvel, controlada por software, se deslocará na vertical através de rodas que deslizam sobre a viga. A excitação da viga é realizada através de um shaker na base de sustentação da estrutura, assim quando o shaker excita a base, sensores captam os deslocamentos da estrutura e enviam, através de um conversor A/D(analógico/digital) as informações para o computador. Um software adequado calculará o quanto a massa deve se deslocar verticalmente na viga para que a estrutura pare de oscilar, isto é, para que ocorra a absorção da vibração. Após os cálculos, o computador enviará um sinal, que é convertido em analógico (conversor D/A), para o motor elétrico que irá efetuar a movimentação da massa sobre a estrutura. Embora, esse modelo não represente fielmente uma situação real, ele pode ser usado com sucesso para demonstrar o funcionamento de um absorvedor. Abaixo, estão representadas a estrutura e o absorvedor :

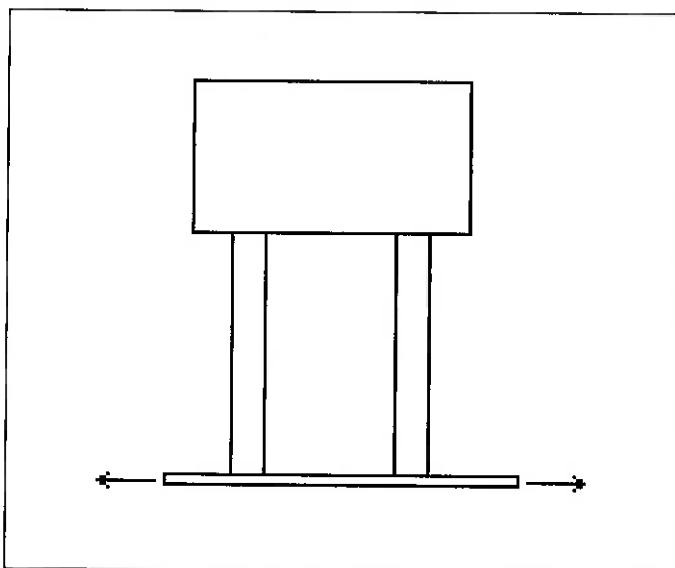


Figura 6.3.1: Modelo da Estrutura

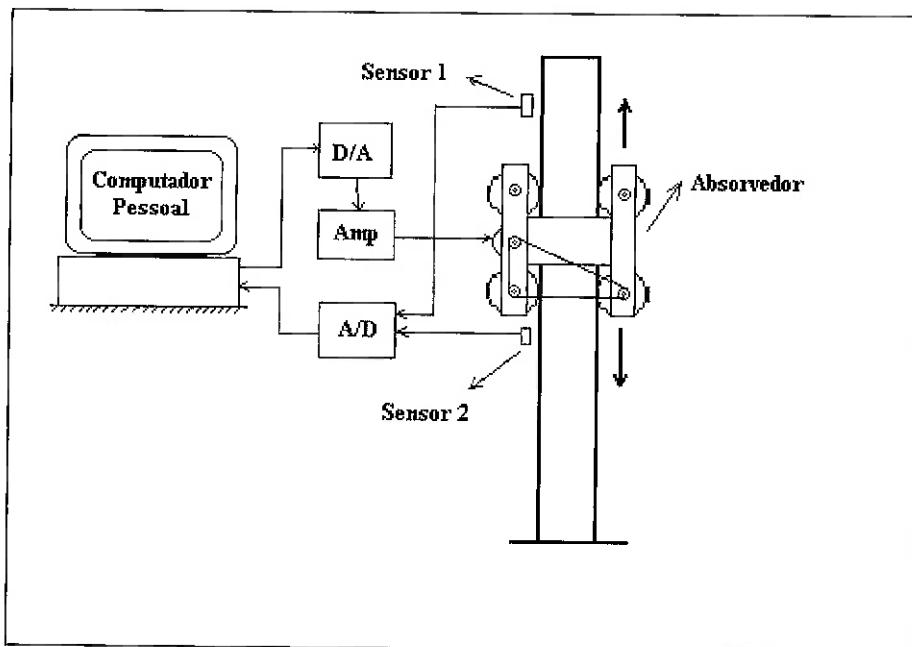


Figura 6.3.2: Funcionamento do Absorvedor Dinâmico de Vibrações Controlado

Assim, o absorvedor ilustrado acima, será colocado na parte superior da estrutura (Figura 6.3.2). À medida que a frequência de excitação é alterada a massa do absorvedor altera seu posicionamento na viga (mola) de maneira que

amplitude de vibração da estrutura tenda a zero, como visto no item de Fundamentação Teórica.

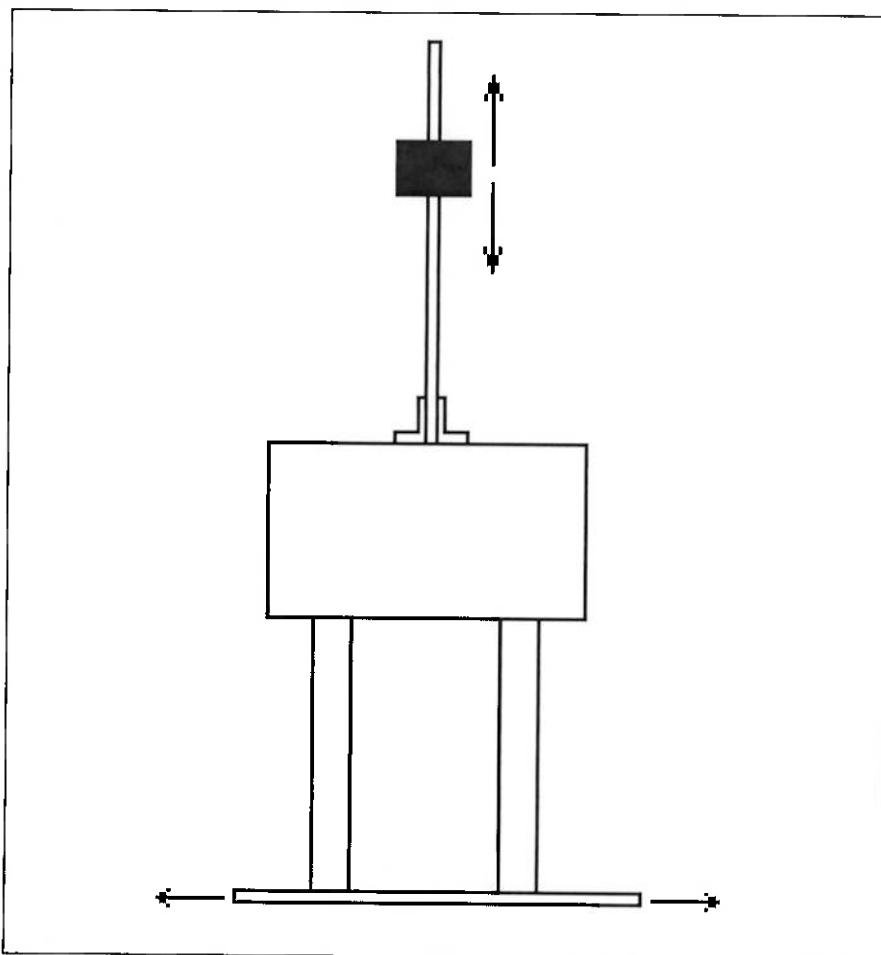


Figura 6.3.3: Estrutura e Absorvedor Dinâmico de Vibrações.

#### 6.4 Solução 4

Essa solução pode ser descrita como uma variação da solução 3, isto é, ela representa uma estrutura igual a solução anterior, porém o absorvedor dinâmico de vibrações tem um outro comportamento. Isto é, no item anterior a massa do absorvedor se movimenta pela viga até que a posição na viga esteja compatível com a posição, calculada nas equações, para que o absorvedor funcione de

maneira correta. Nesse caso a massa está solidária a viga, assim a parte que se movimenta não é mais só a massa, e sim, o conjunto massa/mola(viga). Através desse movimento do conjunto há a variação da rigidez da mola, permitindo assim que esse sistema massa/mola absorva várias frequências de vibração.

Assim, pode-se verificar que o conceito de funcionamento dos dois absorvedores são equivalentes, isto é, o que se altera é a rigidez da mola (viga). Em relação ao controle e forma de aquisição de dados não há alterações significativas. Assim a diferença importante que poderá interferir a favor dessa solução é aquele que se refere a facilidade de construção do protótipo. Na figura 6.4.1 abaixo será mostrado o esquema de funcionamento do conjunto estrutura e absorvedor.

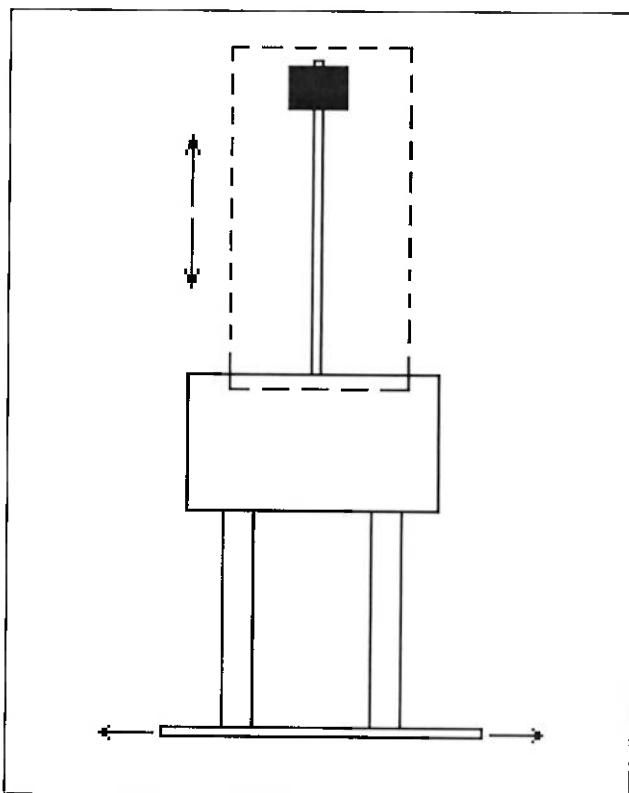


Figura 6.4.1: Estrutura e Absorvedor de Vibrações.

## 7. Escolha da Melhor Solução

A escolha da melhor solução é feita utilizando uma matriz de decisão onde são colocados os itens relevantes para o desenvolvimento do projeto e as possíveis soluções. Os itens possuem pesos variados de acordo com a sua importância para o desenvolvimento do projeto. As notas são aplicadas para cada solução e no final a soma maior dos resultados determina a melhor solução. Abaixo, estão relacionados os itens que serão considerados para esse projeto, bem como sua importância:

- Custo de projeto: esse critério considera os custos que envolvem a fabricação do modelo, a compra ou construção dos equipamentos eletrônicos para realizar o controle, e o tempo de construção do modelo.
- Fidelidade do modelo: esse critério considera o quanto o modelo representa a realidade e sua possibilidade de aplicação em situações reais.
- Confiabilidade: esse critério considera a capacidade de cada solução de funcionar corretamente, com a menor quantidade de erros e imprevistos.
- Controlabilidade: esse critério mensura a dificuldade de se desenvolver um software ou sistema de controle para atender às necessidades do projeto.
- Tempo de projeto: esse critério analisa desde o tempo de modelamento do projeto até sua construção.

Definido os critérios de avaliação para a matriz de decisão, deve-se montar a matriz, atribuindo notas para cada solução, sendo que podem variar da seguinte forma: 10, 7.5 ,5, 2.5. Os valores dos pesos atribuídos para cada critério estão ilustrados na própria matriz.

Critério	Peso	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Custo de projeto	10	5	5	10	10
Fidelidade do modelo	5	10	7.5	5	5
Confiabilidade	7	5	5	10	10
Controlabilidade	7	5	5	10	10
Tempo de projeto	8	5	7.5	7.5	10
Total	-	210	217.5	325	345
Média	-	5.68	5.88	8.78	9.32

*Tabela 7.1: Matriz de decisão para absorvedor dinâmico de vibração controlado*

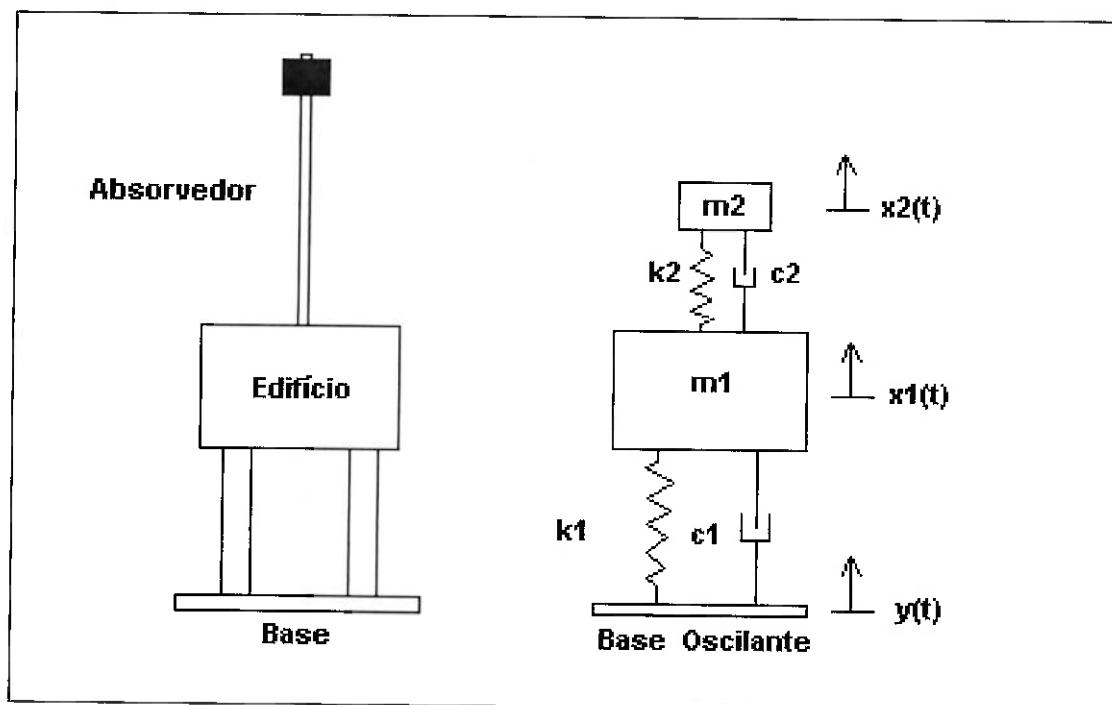
No resultado da matriz de decisão ilustrada acima, pode-se verificar que a solução que teve um desempenho melhor foi a solução 4. Portanto, essa solução será detalhada nos próximos itens e implementada no final do projeto.

## 8. Projeto Básico

Como visto no item 7, a solução escolhida para desenvolver o projeto de um absorvedor dinâmico de vibrações controlado foi a solução 4. Os detalhes de projeto serão apresentados nos próximos sub-itens, bem como uma complementação da teoria de absorvedor e controle aplicada especificamente à essa solução.

### 8.1 Projeto do Conjunto

O modelo do conjunto estrutura/absorvedor pode ser esquematizado utilizando sistemas representativos de massas e molas. Assim, através da esquematização da base oscilante, da estrutura e do absorvedor, pode-se chegar às equações de movimento. A representação do sistema pode ser visto abaixo:



*Figura 8.1.1: Representação Esquemática do Sistema.*

A fundamentação teórica de absorvedor dinâmico de vibrações vista no item 3 foi realizada utilizando um sistema de massa/mola semelhante ao ilustrado acima, porém diferente no que diz respeito a base, isto é, no absorvedor desenvolvido no item 3 a base era fixa e no caso específico do projeto é oscilante. O que será feito na seqüência é utilizar o conceito de absorvedor desenvolvido anteriormente e aplicar ao conceito de base oscilante também descrita no item 3.

Logo após os cálculos do absorvedor, será realizado o projeto da estrutura considerando os parâmetros calculados no item projeto do Absorvedor.

## 8.2 Projeto do Absorvedor Dinâmico de Vibrações

Como visto anteriormente, o projeto do absorvedor será realizado utilizando o modelo de base oscilante e o modelo de absorvedor. Deve-se verificar na figura que segue abaixo uma pequena variação no modelo no que se refere a utilização de um amortecimento ilustrado pela letra  $c$  nos modelos apresentados anteriormente. No entanto, a não utilização desse amortecimento não deverá causar diferenças significativas nas simulações e na experiência, pois o conjunto é pequeno e funcionará apenas em algumas faixas de frequências.

Assim, pode-se verificar a figura com o modelo do projeto e as equações diferenciais que o representam:

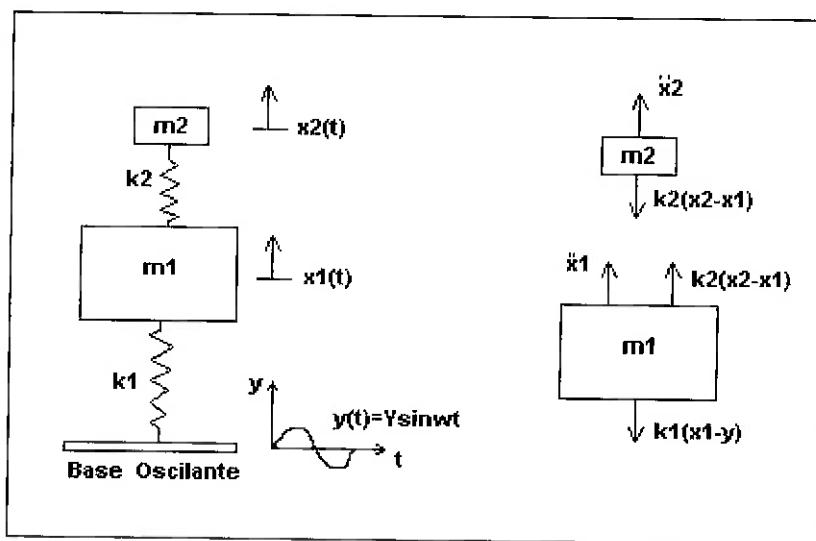


Figura 8.2.1: Representação Esquemática do Projeto.

$$m_1 x_1 + k_1(x_1 - y) - k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (8.2.1)$$

$$m_2 x_2 + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (8.2.2)$$

Substituindo  $y(t)=Y\sin wt$  no conjunto de equações (8.2.1) e (8.2.2), tem-se:

$$m_1 x_1 + k_1 x_1 - k_2(x_2 - x_1) = k_1 Y \sin wt \quad (8.2.3)$$

$$m_2 x_2 + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (8.2.4)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} x_j &= X_j \sin wt \\ x_j &= X_j w \cos wt \quad , j=1,2 \\ x_j &= -X_j w^2 \sin wt \end{aligned} \quad (8.2.5)$$

Substituindo a equação (8.2.5) no sistema de equações (8.2.3) e (8.2.4), tem-se um outro sistema de equações que será resolvido achando o determinante e igualando a zero. Assim:

$$\det[(k_2 + k_1 - m_1 w^2)(k_2 - m_2 w^2) - k_2^2] = 0 \quad (8.2.6)$$

Através da resolução das equações diferenciais, pode-se obter a equação que determina a frequência natural, sendo essa função da rigidez e da massa, como pode ser visto abaixo:

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8.2.7)$$

Onde o k= rigidez da viga, pode ser obtido através da equação:

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (8.2.8)$$

Assim, substituindo a equação (8.2.8) na (8.2.7), tem-se:

$$w = \sqrt{\frac{3EI}{ml^3}} \quad (8.2.9)$$

Através da equação acima é possível obter os valores de posição do absorvedor em função da frequência. No item simulação, essas equações, serão utilizadas.

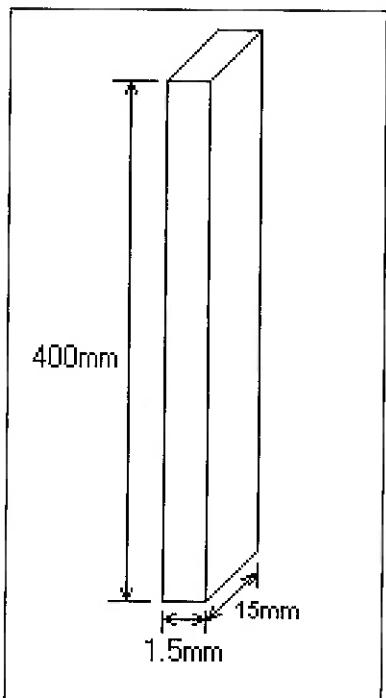
Para que o melhor aproveitamento visual da experiência, deve-se adotar uma faixa de vibração pequena, isto é, variando de 1Hz a 10Hz. Adotando a frequência de ressonância do sistema principal w=4.4 Hz e o K=400N/m (rigidez da mola), chega-se que o valor da massa do sistema principal deve ser M=572g.

Para a massa do absorvedor, deve-se adotar uma proporção aproximadamente cinco vezes menor. Assim, a massa do absorvedor é m=114g.

O material utilizado na viga deve ser alumínio, cujo módulo de elasticidade é E=70GPa. O momento de inércia dessa viga pode ser calculado através da equação a seguir:

$$I = \frac{bh^3}{12} = 4.22 \times 10^{-12} \quad (8.3.0)$$

As dimensões da viga (mola) do absorvedor foram calculadas da melhor forma possível para que ao término de todos os cálculos, a posição do absorvedor não ultrapassasse os  $l=400\text{mm}$  e a frequência  $w$  ficasse dentro da faixa anteriormente descrita. As dimensões da viga do absorvedor estão mostradas abaixo:



*Figura 8.2.2: Dimensões da Viga.*

### 8.3 Projeto Estrutura/Absorvedor

Esse item tem como objetivo, mostrar o conjunto detalhado da estrutura e do absorvedor. Na primeira figura (figura 8.4.1), há um esquema 2D de como é o projeto completo. A seguir serão mostradas três outras figuras em 3D para melhor visualização.

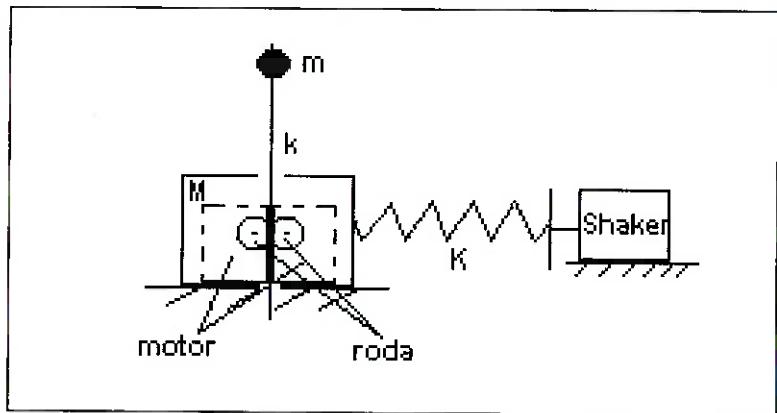


Figura 8.3.1: Modelo 2D.

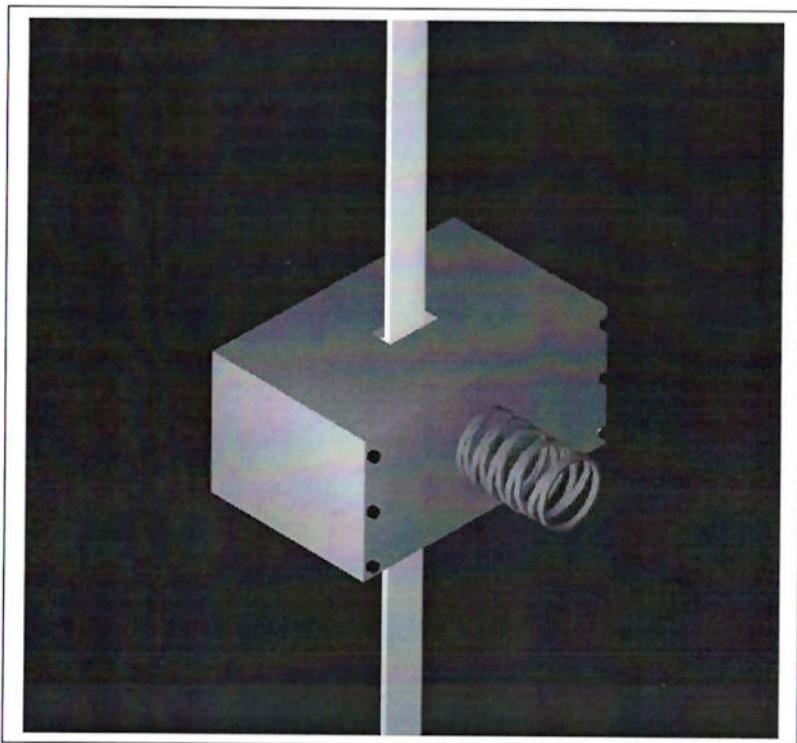


Figura 8.3.2: Modelo 3D – Absorvedor Face1.

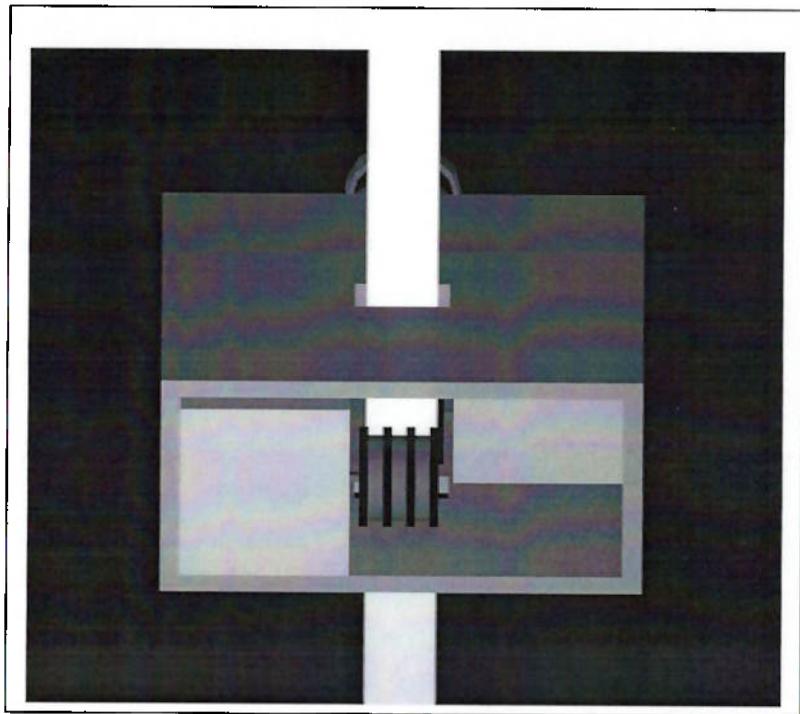


Figura: 8.3.3: Modelo 3D – Absorvedor Face2.

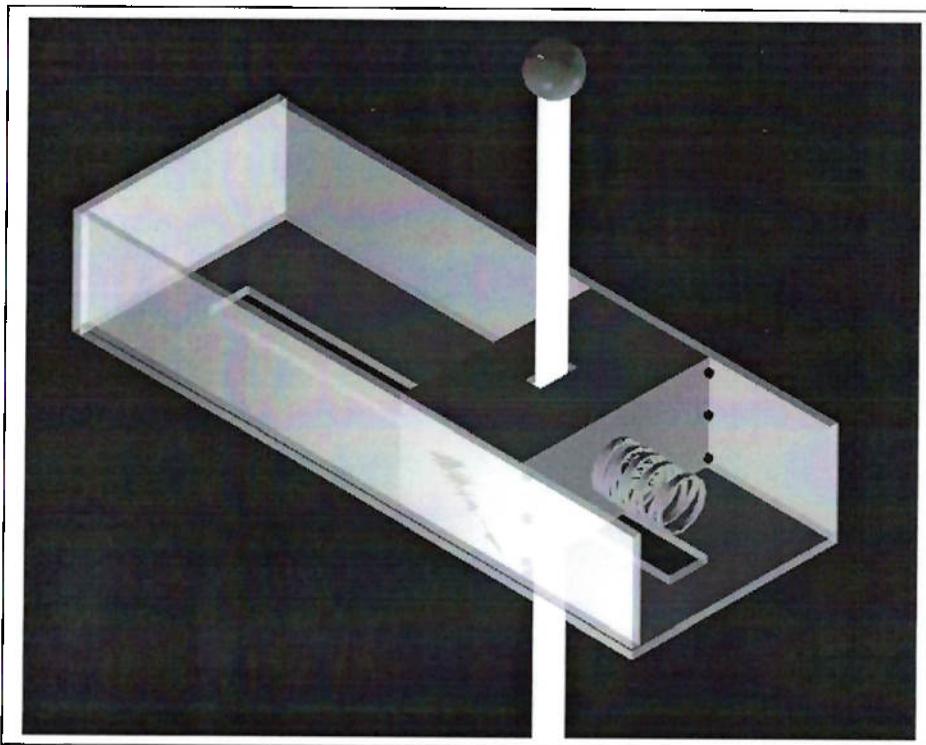


Figura 8.3.4: Modelo 3D – Conjunto Estrutura/Absorvedor.

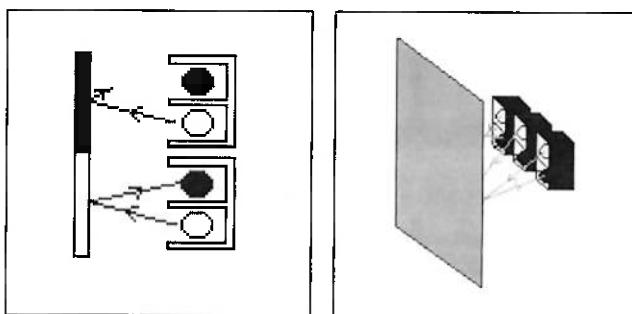
## 8.4 Controle

Como descrito no item de fundamentação teórica, existem dois tipos básicos de controle : malha aberta e malha fechada.

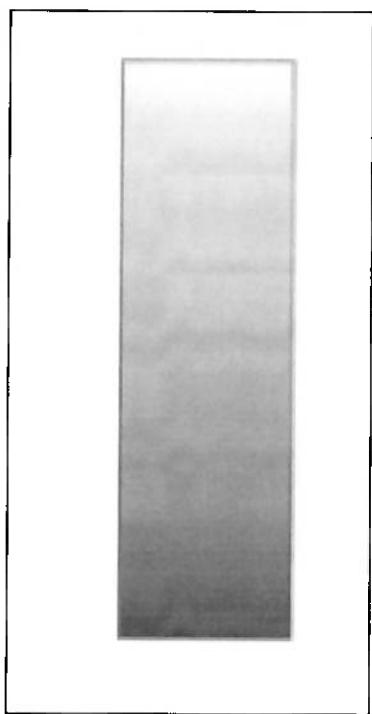
Nesse trabalho foram utilizados os dois tipos acima citados. O sistema de malha aberta impõe uma posição para o absorvedor a partir da freqüência de excitação do shaker, sem garantir que o absorvedor funcionará .

O sistema em malha fechada é composto de um sensor óptico chamado de chave-óptica, cuja representação está na figura 8.4.1, e do próprio sistema em si. Assim, seu controle funciona da seguinte maneira: O sensor óptico lê , através de um código que está pintado na viga (figura 8.4.2), a posição em que o absorvedor se encontra. O valor medido é comparado com o valor calculado anteriormente pelo programa utilizando a frequência . Sendo o valor diferente do calculado a placa atua sobre os motores para que eles posicionem o absorvedor de maneira a igualar as medidas. O que caracteriza a malha fechada é o fato de o sensor sempre estar verificando se o posicionamento está coerente com o calculado.

Além disso, vale ressaltar que o sistema de malha aberta acima poderia ser transformado em malha fechada se houvesse mais um acelerômetro que medisse a amplitude do sistema principal, comprovando que ela é zero e que portanto o absorvedor funcionou.



*Figura 8.4.1: Representação da Chave-Óptica.*



*Figura 8.4.2: Viga com Código.*

## 9. Esquema de Medição de Vibração

A figura abaixo (figura 9.1), ilustra as características básicas de um esquema de medição de vibração. Nessa figura, o movimento (ou força dinâmica) de um comporto vibrando é convertido em um sinal elétrico pelo transdutor. Em geral , um transdutor é um instrumento que transforma comportamentos mecânicos (como deslocamento, velocidade, acelerômetro, força) em elétricos (como voltagem ou corrente). O sinal de saída, seja voltagem ou corrente, de um transdutor, é muito pequena para ser aquisitada diretamente, assim é utilizado um conversor de sinal que amplifica o sinal para um valor mais adequado para ser aquisitado pelo computador. Os dados, então adquiridos, podem ser analisados ou utilizados para outros estudos. Nos próximos itens será detalhado o sistema de aquisição de dados utilizado no projeto.

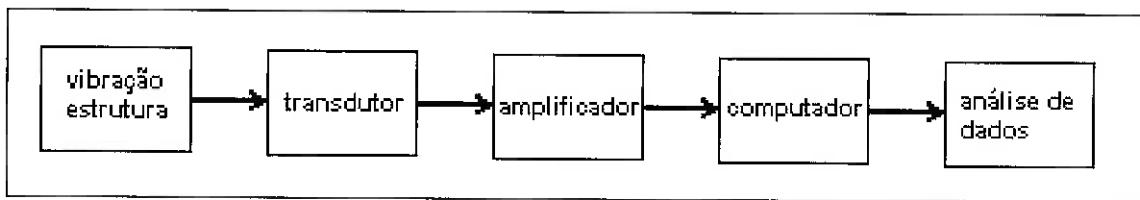
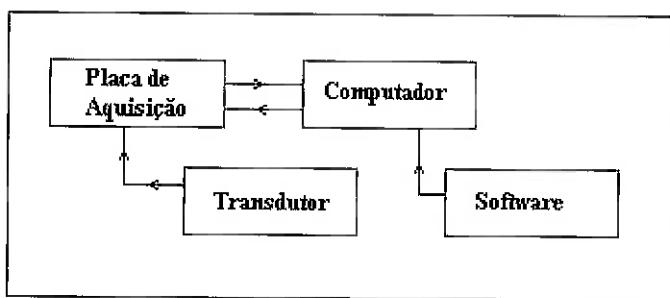


Figura 9.1: Esquema Básico de Medição de Vibração.

## 10. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é composto pela placa de aquisição de dados, computador pessoal, transdutor (acelerômetro) e software. Abaixo, há um esquema (*Figura 10.1*) do sistema de aquisição de dados e o detalhamento de alguns dos itens nele contido:



*Figura 10.1: sistema de aquisição de dados*

### 10.1 Placa de Aquisição de Dados

A Placa de aquisição de dados é uma placa que contém canais de entrada e saída que podem ser ligados ao computador para receber ou transmitir dados. No caso desse trabalho serão utilizadas uma entrada que receberá o sinal do acelerômetro e uma saída que será utilizada para movimentar o carrinho.

Essa placa de aquisição de dados é uma série DaqBoard/2000 com 16bits, 200kHz PCI Data Aquisition. Isto é, ela possui 16bits de resolução do conversor analógico/digital (interno à placa) e 200 kHz de máxima frequência de amostragem.

### 10.2 Software

O software utilizado nesse projeto é o Absorvedor.exe feito em Visual Basic 6.0. Esse software será utilizado para simular o comportamento do sistema e também calcular os valores do absorvedor dinâmico de vibrações. Além disso, esse software tem uma interface direta com a placa de aquisição, o que lhe

permite enviar e receber dados diretamente , sem a necessidade de se utilizar outros conversores A/D ou D/A. O programa está descrito e comentado em anexo.

### 10.3 Transdutor e Atuador

Como descrito anteriormente o transdutor é um instrumento de medição que transforma comportamentos mecânicos (como deslocamento, velocidade, acelerômetro, força) em elétricos (como voltagem ou corrente). O transdutor utilizado nesse projeto é um acelerômetro (figura 10.3.1). Acelerômetros são mundialmente utilizados para medir vibração e também gravar dados sobre terremotos. Assim, através desses dados gravados é possível obter velocidade e deslocamento pela integração da aceleração. Diferenciando a equação  $y(t)=Y\sin\omega t$ , obtém-se:

$$-z(t)\omega_n^2 = \frac{1}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{1/2}} \{-Y\omega^2 \sin(\omega t - \phi)\} \quad (10.3.1)$$

Como:

$$\frac{1}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{1/2}} \approx 1 \quad (10.3.2)$$

Então a equação (10.3.1) fica :

$$-z(t)\omega_n^2 = -Y\omega^2 \sin(\omega t - \phi) \quad (10.3.3)$$

Comparando a equação (10.3.3) com  $\ddot{y}(t) = -Y\omega^2 \sin(\omega t - \phi)$ , encontra-se que o termo  $z(t) = \omega_n^2$  dá a aceleração da base  $\ddot{y}$ , exceto pela fase  $\phi$ . Portanto, o instrumento pode ser utilizado para gravar diretamente o valor de  $\ddot{y} = -z(t)\omega_n^2$  e o tempo de defasagem pode ser expressado como sendo  $t' = \phi/\omega$ .

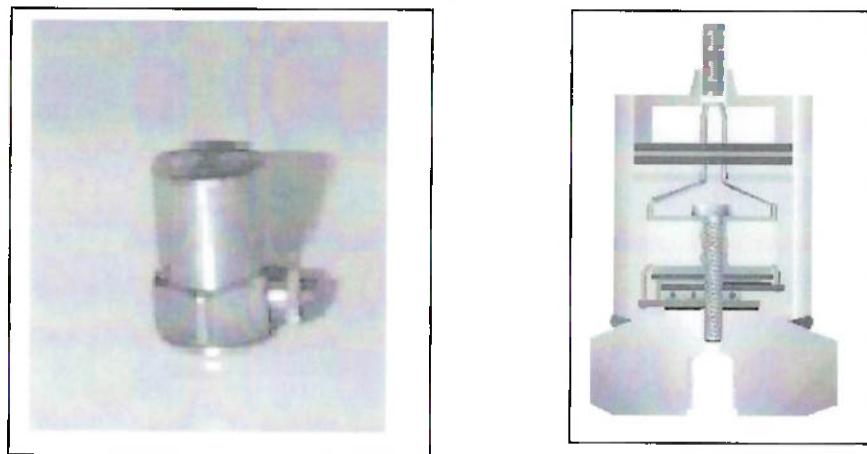


Figura 10.3.1: Acelerômetro.

Nesse projeto é utilizado um atuador (figura 10.3.2) para simular as condições reais, isto é, ele será responsável pelo deslocamento da base (excitação). O atuador utilizado é pode ser chamado de *Shaker* e será instalado na base para atuar em sua movimentação.



Figura 10.3.2: Shaker.

## 11. Simulação e Resultados

A primeira simulação realizada no MatLab tem como objetivo mostrar as diferentes posições tomadas, pelo absorvedor dinâmico de vibrações que foi calculado no item projeto do absorvedor, de acordo com a frequência de excitação. Assim através das equações e de alguns parâmetros previamente definidos, pode-se programar em MatLab como pode ser visto nos apêndices que se encontram no final do trabalho.

Apesar do programa ser considerado simples seu resultado é muito importante, pois permite visualizar como a frequência de excitação de um sistema se relaciona com a posição do absorvedor e consequentemente o que acontece com a rigidez desse sistema secundário. Abaixo estão os gráficos de  $l$  [m] (deslocamento do absorvedor) x  $w$  [rad/s] (frequência),  $k$  [N/m] (rigidez da viga) x  $w$  [rad/s] (frequência) e  $k$  [N/m] (rigidez) x  $l$  [m] (deslocamento do absorvedor).

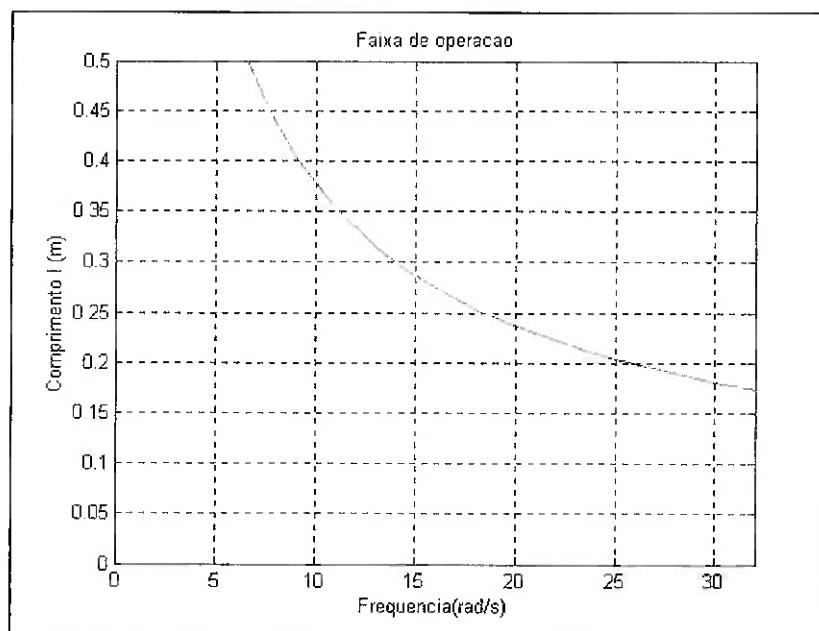


Gráfico 11.1:  $l$  [m] x  $w$  [rad/s].

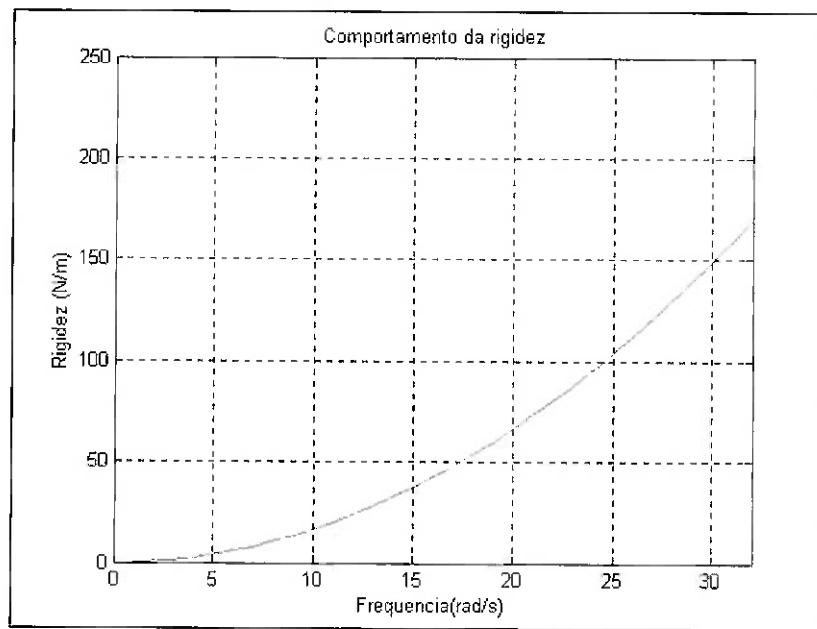


Gráfico 11.2:  $k[N/m]$  x  $w[rad/s]$ .

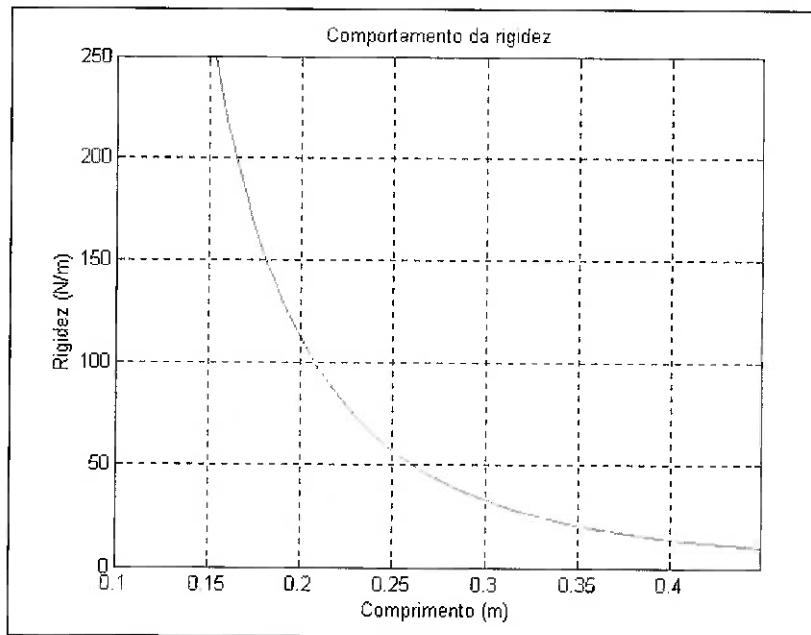


Gráfico 11.3:  $k[N/m]$  x  $l[m]$ .

Nessa próxima simulação, considerou-se o sistema completo, isto é, o conjunto composto pela estrutura e o absorvedor. Através da simulação utilizando as equações descritas no item detalhamento da solução, pode-se gerar um gráfico de amplitude x tempo para se verificar o comportamento do absorvedor e da estrutura, podendo concluir sobre o absorvedor. Abaixo estão duas simulações para o conjunto de parâmetros: 1)  $w=10\text{rad/s}$  e  $k=20\text{N/m.}$ ; 2)  $w=20\text{rad/s}$  e  $k=80\text{N/m.}$

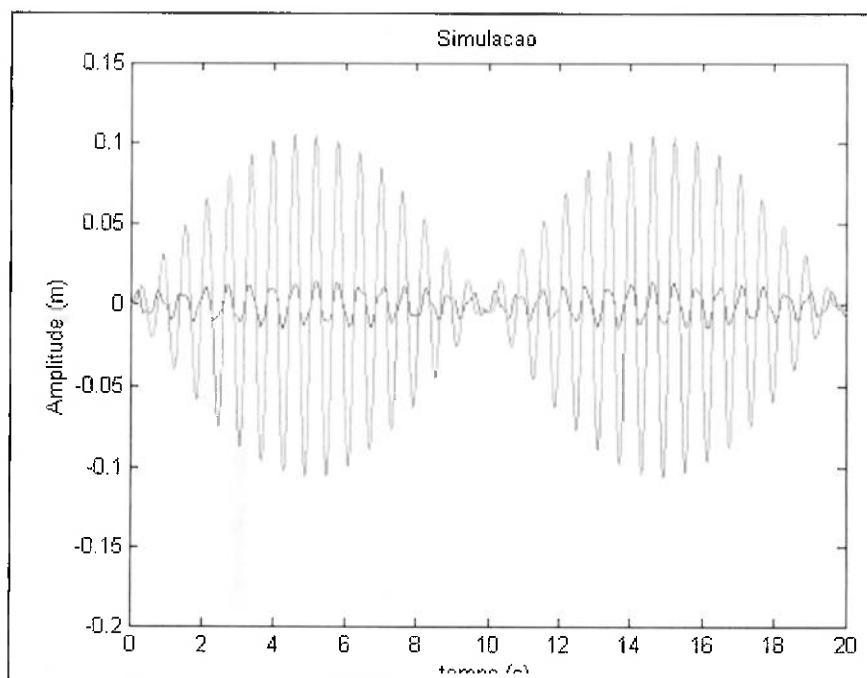


Gráfico 11.4:  $w=10\text{rad/s}$  e  $k=20\text{N/m.}$

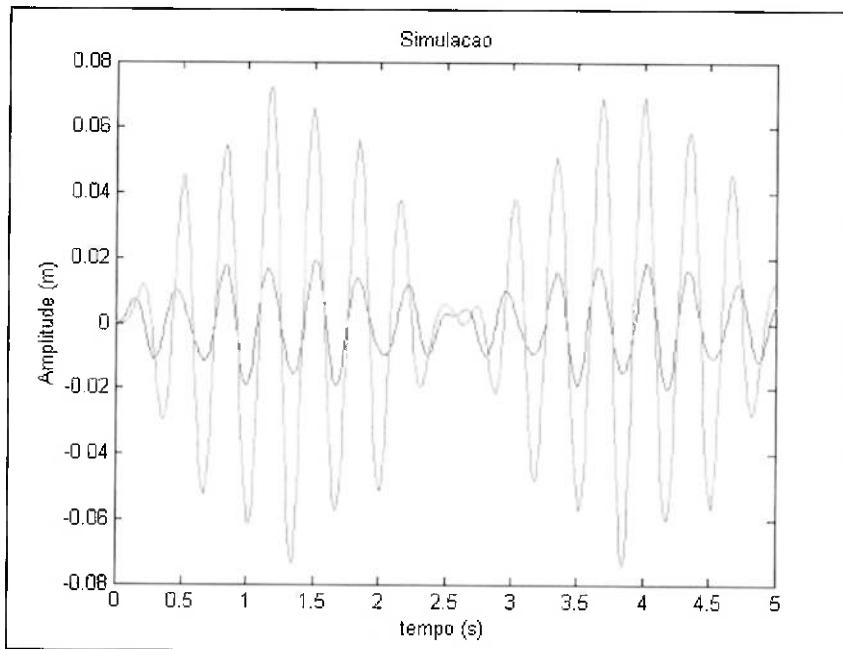


Gráfico 12.5:  $w=20\text{rad/s}$  e  $k=80\text{N/m}$ .

Nos dois gráficos acima, pode-se verificar que o absorvedor conseguiu desempenhar sua função que era eliminar ou reduzir consideravelmente a amplitude de vibração do sistema principal. Além disso, poderiam ser realizadas inúmeras simulações, variando a freqüência e a rigidez, porém já se consegue perceber através desses dois exemplos que para qualquer conjunto de valores dentro daquela faixa pré-estabelecida, o sistema converge para o mesmo resultado que é a minimização da amplitude do sistema principal, comprovando assim que o sistema de controle também funcionou adequadamente.

## 12. Funcionamento do Sistema Experimental

Nesse item será apresentada a parte experimental do projeto, isto é, como foram realizadas as medições, fotos do protótipo, os resultados e a explicação detalhada do funcionamento da experiência. Abaixo está uma figura que ilustra a interface do programa, em VB, com o usuário. Logo em seguida o esquema de funcionamento do experimento e a explicação detalhada desse esquema.

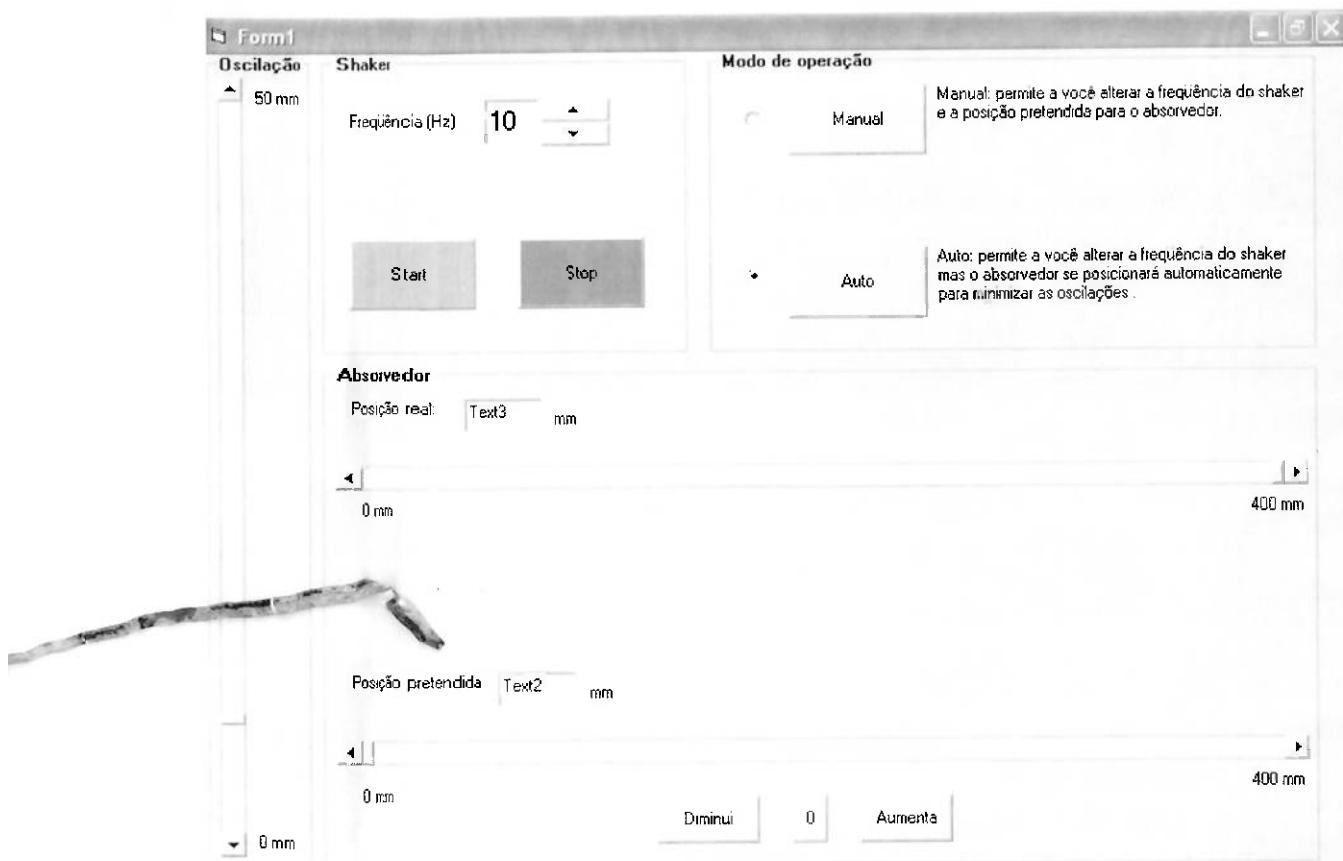
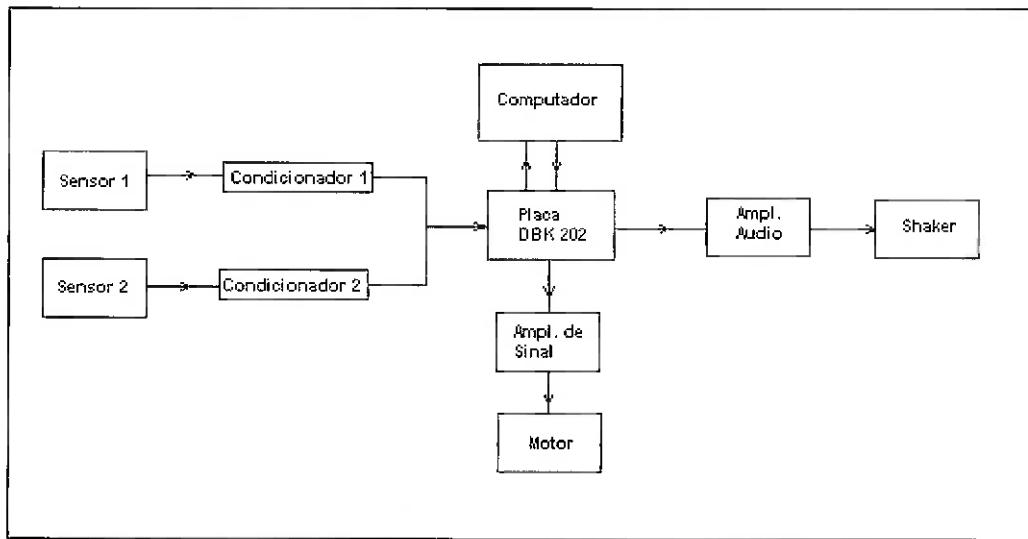


Figura 12.1: Interface do Programa.



*Figura 12.2: Esquema de Funcionamento.*

O sistema entra em operação quando o usuário escolhe a frequência de vibração e aciona o botão de *start*. Nesse instante, a placa gera um sinal de onda senoidal que será amplificado, por um amplificador de áudio, e enviado ao Shaker que vibrará na frequência escrita na interface. Essa frequência é então utilizada para calcular a posição pretendida , sendo essa a posição ideal para que ocorra o fenômeno de absorção de vibração. Esse valor pretendido(calculado) é mostrado na caixa de texto2. Nesse momento o usuário poderá escolher entre dois modos de operação: modo manual e modo automático. Se o usuário optar pela operação manual, o controle de posição da massa/mola será realizado por ele mesmo através dos botões *diminui - 0 - aumenta*, que acionará os motores. Assim o usuário poderá movimentar o absorvedor de maneira a verificar o comportamento do fenômeno. Caso a opção seja pelo modo automático, assim que o usuário escolhe a frequência e liga o botão de *start*, o sensor1 (sensor óptico da viga) realiza a leitura da posição da viga, através do código como visto anteriormente, e mostra na caixa de texto3 em tempo real de leitura. Porém é necessário a utilização de um condicionador de sinais (condicionador1-figura11.3) para poupar esse sensor óptico de possíveis variações de tensão e consequentemente sua

falha. Esse sinal condicionado é então enviado à placa e ao software. No software, esse valor medido é então comparado ao valor pretendido já calculado assim que o usuário escolheu a frequência. Caso essa diferença de valores seja diferente de zero, o programa executa uma rotina para que a placa acione automaticamente os motores até que o sensor1 esteja lendo o valor exatamente igual ao calculado, isto é , que o absorvedor esteja na posição adequada para o total ou parcial absorvimento de vibração. Para o acionamento dos motores seja no modo manual o automático é necessário utilizar um amplificador de sinais (figura11.4) , pois o sinal da placa é insuficiente para acionar os motores. Além disso, existe um segundo sensor2 e seu condicionador2 para mostrar na tela a oscilação da estrutura principal, isto é a variação da amplitude de acordo com a frequência dada. Assim, é possível verificar visualmente e na tela que houve o absorvimento da vibração.

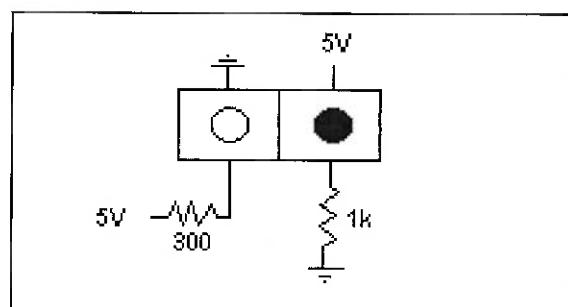


Figura 12.3 :Sensor e Condicionador de Sinais.

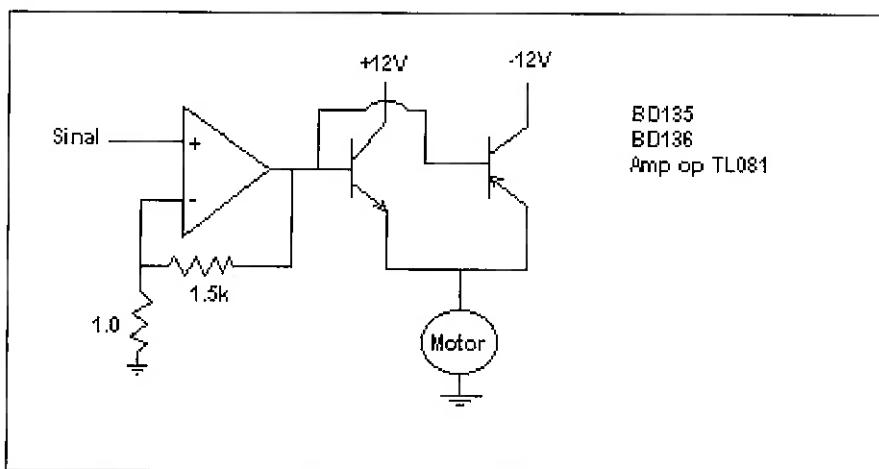
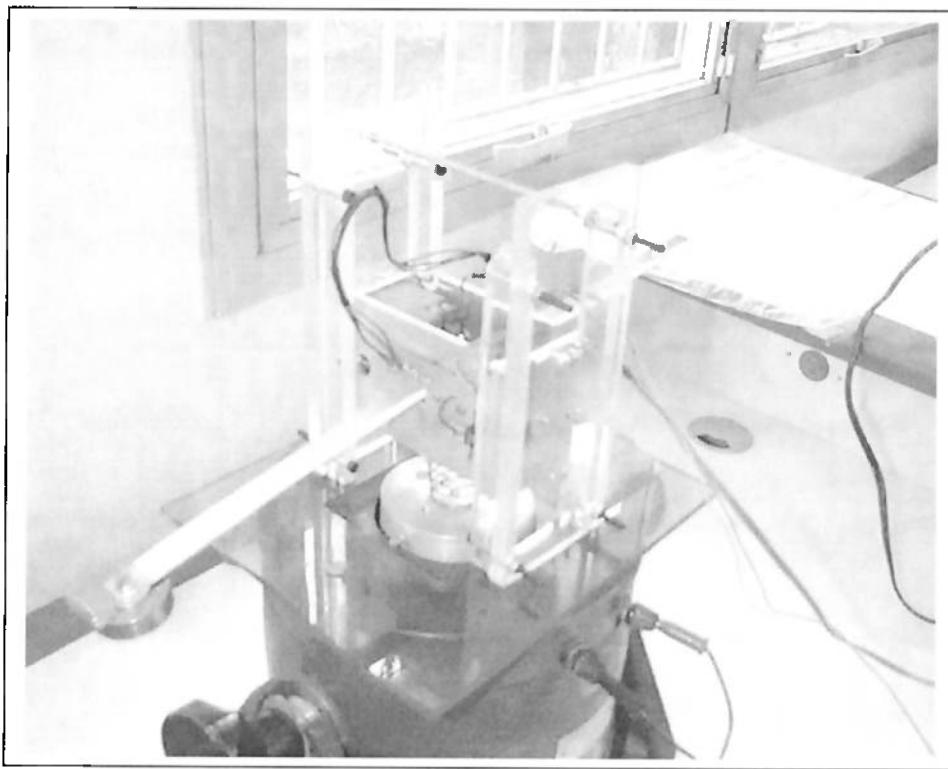


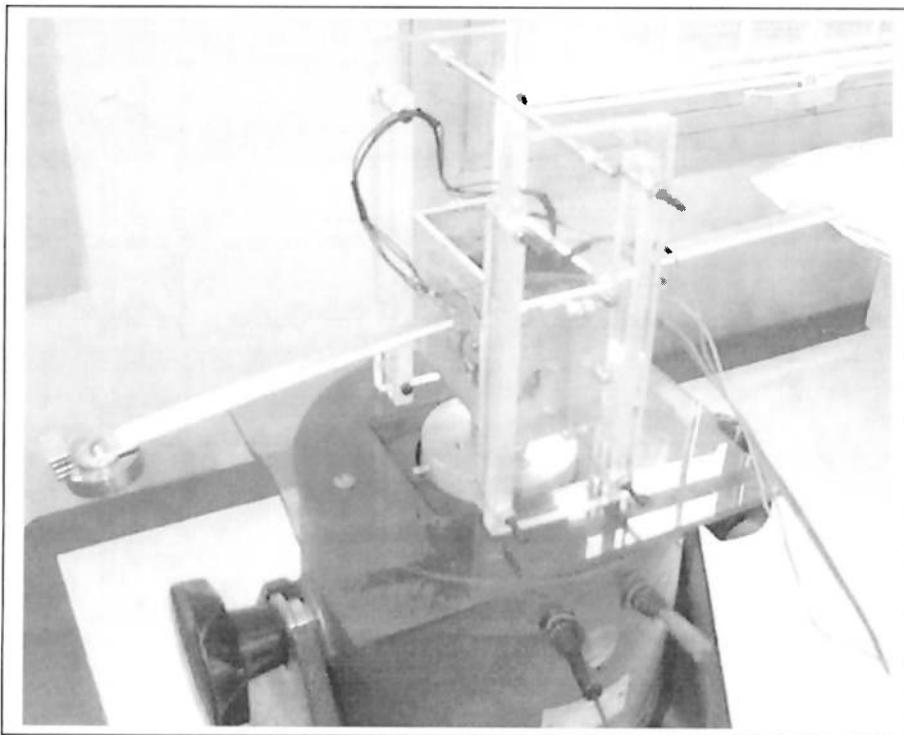
Figura 12.4 : Amplificador de Sinais.

## 12.1 Fotos do Protótipo

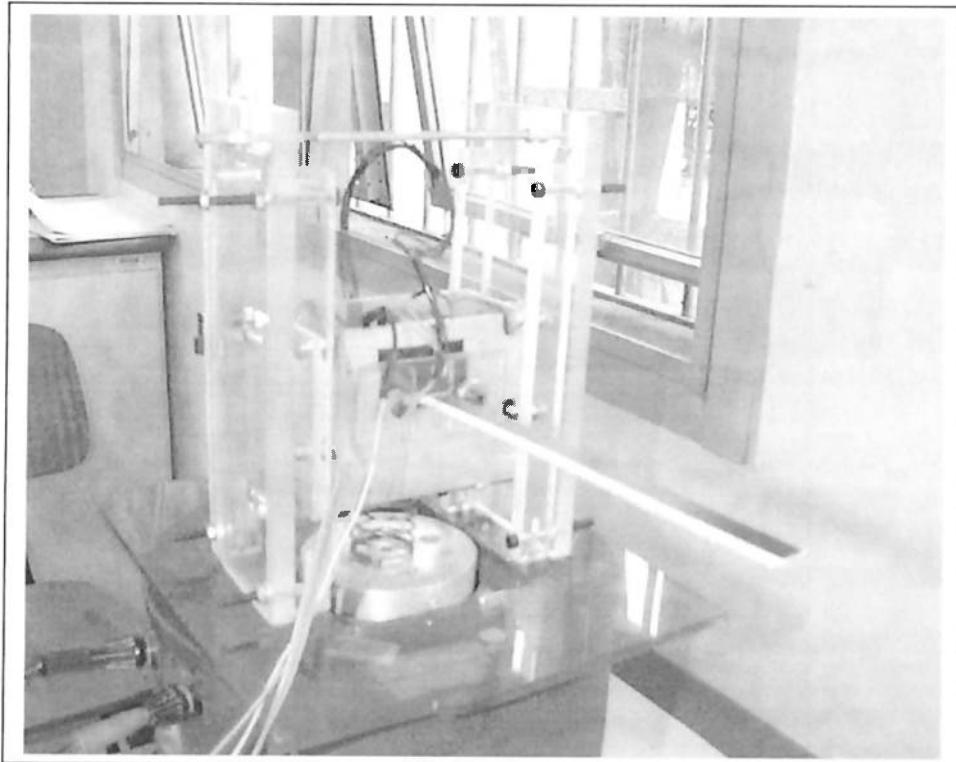
Abaixo estão ilustradas três fotos do protótipo tiradas no Laboratório de Vibrações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Nas fotos, pode-se verificar o absorvedor que é a viga com a massa na ponta. Além disso, há uma estrutura para permitir que o sistema principal de massa/mola deslize sem qual atrito. Os sensores estão soldados na placa de fenoliti e os motores se encontram dentro do sistema principal, fazendo parte da massa total.



*Figura 12.1.1: Foto 1 do Protótipo.*



*Figura 12.1.2: Foto 2 do Protótipo.*



*Figura 12.1.3: Foto 3 do Protótipo.*

## 12.2 Resultados Experimentais

Nesse item foi realizada duas medições, frequência de 4.1Hz e 6.6Hz para mostrar que houve absorção . Essas freqüências foram escolhidas aleatoriamente apenas para constar como exemplos, pois na verdade esses gráficos podem ser obtidos para qualquer freqüência entre 1Hz e 10Hz. Nesses gráficos pode-se verificar a diminuição da amplitude (absorção da vibração) quando o absorvedor está posicionado corretamente escala da viga (curva crescente) .

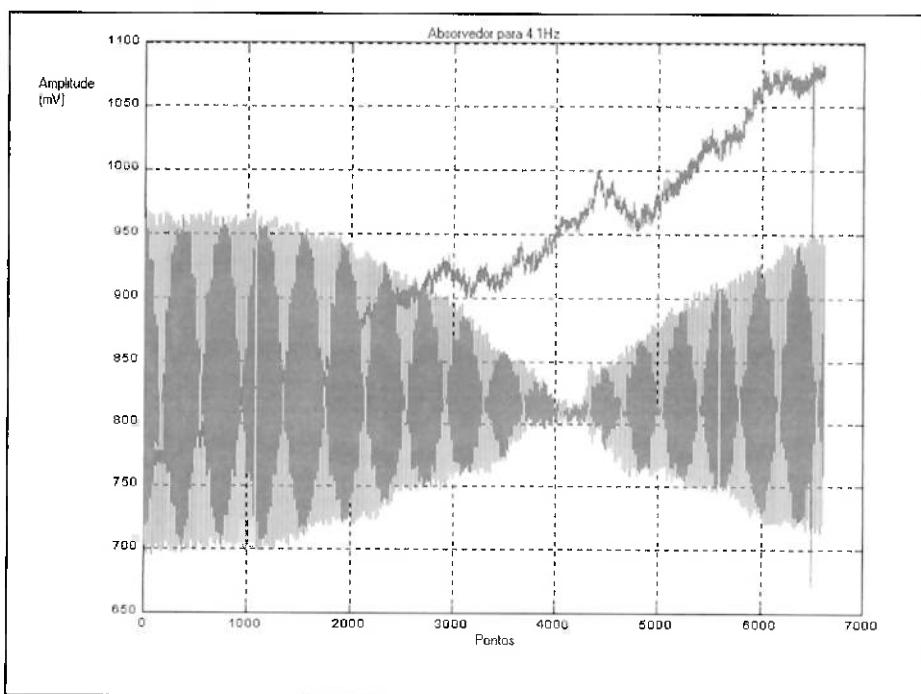


Gráfico 12.2.1: Absorvedor para 4.1Hz.

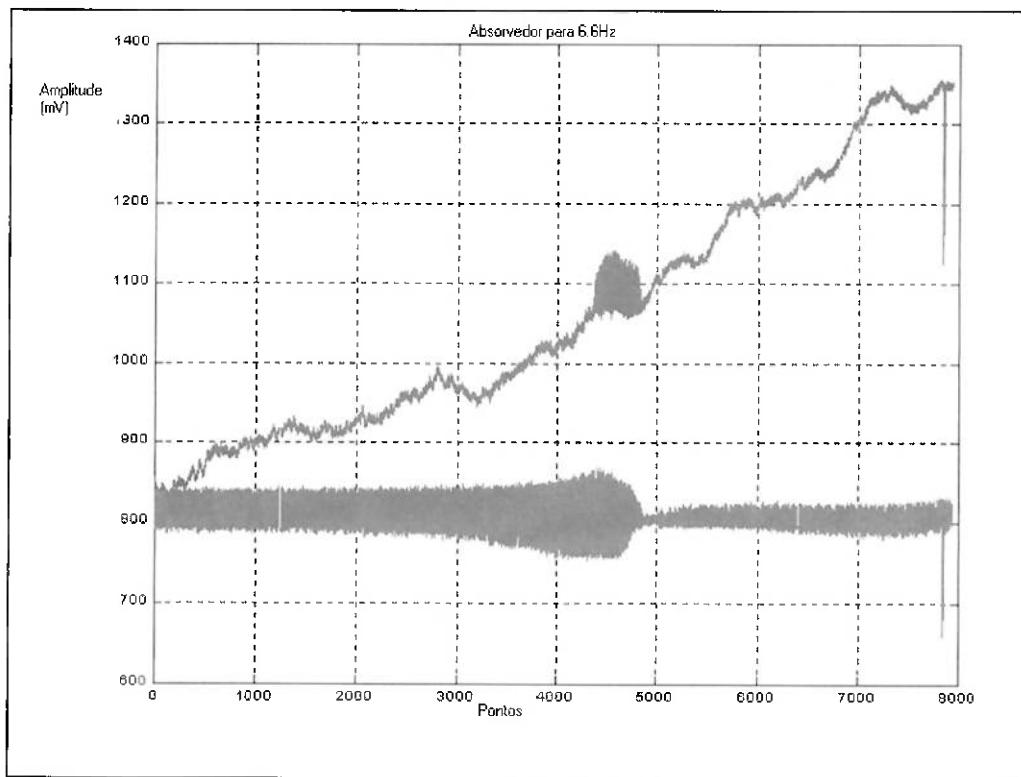
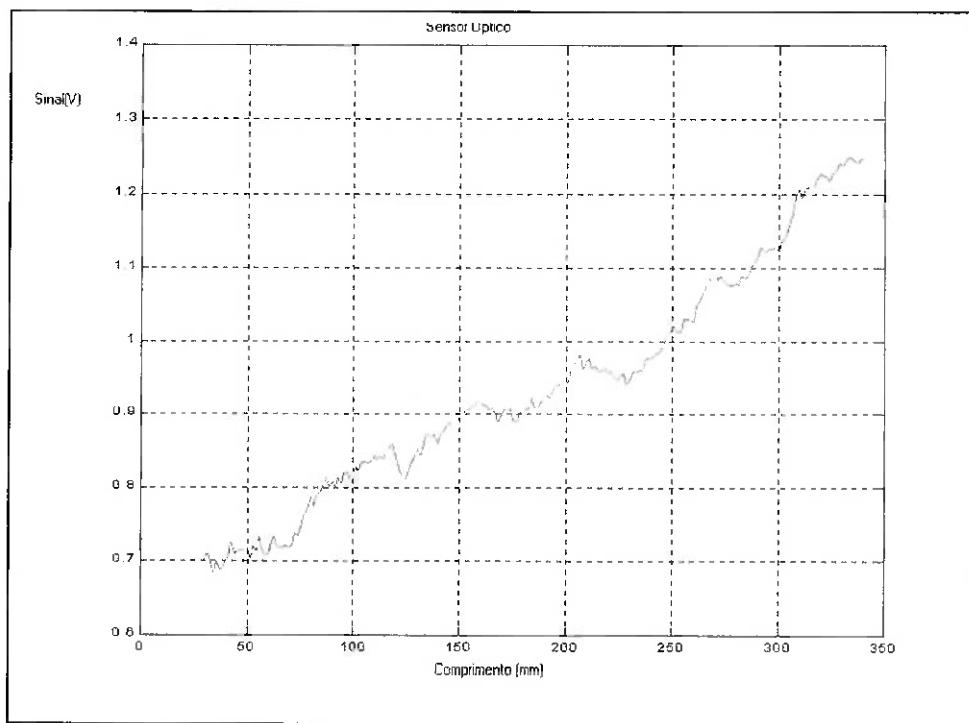


Figura 12.2.2: Absorvedor para 6.6Hz.

O gráfico abaixo representa a aquisição do sinal realizado pelo sensor pelo comprimento da viga. Pode-se verificar por esse gráfico que a medição do sensor não é linear, sendo uma das possíveis causas dessa falta de linearidade a má qualidade de impressão do código ou até mesmo a cola que há entre o papel e a viga de alumínio.



*Figura 12.2.3: Sensor Óptico.*

## 13. Conclusão

Através das simulações realizadas em MatLab foi possível verificar como se comporta um absorvedor dinâmico de vibrações controlado e comprovar que esse absorvedor funciona. Porém, somente com a parte experimental foi possível verificar visualmente o fenômeno de vibração e a eficiência do absorvedor.

Quanto a eficiência desse absorvedor, pode-se considerar satisfatória apesar das dificuldades de precisão na construção do protótipo e da falta de linearidade da medição realizada pelo sensor .

Além disso as simulações e a experiência permitiram concluir que mesmo para um absorvedor dinâmico de vibrações que é controlado, não é possível abranger todas as faixas de frequências.

Assim em projetos de estruturas reais, os projetistas devem definir uma faixa de frequência de acordo com a experiência adquirida ao longo dos anos com os fenômenos naturais que ocorrem na região em que a estrutura será construída. Com esse histórico em mãos, os projetistas procuram calcular a estrutura da melhor maneira possível, preparando-a para suportar alguns dos fenômenos naturais locais. Assim, com o intuito de aumentar a segurança desses projetos, sem ter que encarecer, alterar as características básicas ou aumentar demasiadamente a estrutura em si, o absorvedor dinâmico de vibrações controlado serve como excelente e confirmada opção para atuar em faixas de frequências consideradas de risco .

Portanto, a tendência de tornar realidade os projetos mais ousados, em arquitetura e engenharia, ultrapassando todos os limites do imaginável, tem seu alicerce fundamentado nos estudos contínuos em vibrações que buscam novas tecnologias de absorção e maior confiabilidade nas já existentes.

## Apêndice 1: Programa em MatLab para Gerar os Gráficos

### 12.1,12.2,12.3.

```

function[l] = equacao

% variáveis

w=linspace(1,10*2*pi,100);
E = 70E9; % módulo de elasticidade do alumínio
m = 0.166; % massa do absorvedor
I = 4.22E-12; % momento de inercia

for i=1:100

l(i)=(3*E*I/((w(i)^2)*m))^(1/3);
k(i)=(3*E*I)/(l(i)^3);

end

plot(w,l);
axis([0 32 0 0.5]);
xlabel('Frequencia(rad/s)');
ylabel('Comprimento l (m)');
title('Faixa de operacao');
grid;

figure;
plot(w,k);
xlabel('Frequencia(rad/s)');
ylabel('Rigidez (N/m)');
title('Comportamento da rigidez');
axis([0 32 0 250]);
grid;

```

```
figure;
plot(l,k);
xlabel('Comprimento (m)');
ylabel('Rigidez (N/m)');
title('Comportamento da rigidez');
axis([0.1 0.45 0 250]);
grid;
```

## Apêndice 2: Programa em MatLab para Gerar os Gráficos 12.4, 12.5.

```
function dx=rigid(t,x)
y=0.005;
w=20;
k1=400;
k2=80;
m1=0.830;
m2=0.166;
dx = zeros(4,1);
dx(1) = x(3);
dx(2) = x(4);
dx(3) = (-k1*x(1)+k2*x(2)-k2*x(1)+k1*y*sin(w*t))/m1;
dx(4) = (-k2*x(2)+k2*x(1))/m2;

function x=a
X(1,1)=0;
X(1,2)=0;
X(1,3)=0;
X(1,4)=0;
[T,X] = ode45(@rigid,[0 5],[X(1,1) X(1,2) X(1,3) X(1,4)]);
figure;
plot(T,X(:,1),'b',T,X(:,2),'r')
xlabel('tempo (s)');
ylabel('Amplitude (m)');
title('Simulacao');
```

### Apêndice 3: Programa em MatLab para Gerar o Gráfico 4.1.1

```

function[a1,b]=equacao3()

i=1;
j=1;
a1=linspace(0,16,100);
b=linspace(0.6,1.3,100);
a2=linspace(0,16,100);
b2=linspace(0.6,1.3,100);

w1=1;
w2=1;
w3=1;
w4=0.00001;

while i<101

a1(i)=(1-(b(i)*w1/w2)^2)/((1+1/20-(b(i))^2)*(1-(b(i)*w1/w2)^2)-1/20);
i=i+1;
end

while j<101

a2(j)=(1-(b2(j)*w3/w4)^2)/((1+1/20-(b2(j))^2)*(1-(b2(j)*w3/w4)^2)-1/20);
j=j+1;
end

plot(abs(b),abs(a1),'g-',abs(b2),abs(a2),'b--')
axis([0.6 1.3 0 16])
xlabel('w/w1')
ylabel('X1/deslocamento')

```

## Apêndice 4: Programa em MatLab para Gerar o Gráfico 4.1.2

```

function[a1,a2,a3,a4,a5]=deslocamento()

i=1;
r=linspace(0,2,100);
t1=0.3;
t2=0.2;
t3=0.1;
t4=0.05;
t5=0.026;

for i=1:100

    a1(i)=(((1+(2*t1*r(i))^2)/(((1-r(i)^2)^2)+((2*t1*(r(i))^2))))^0.5;
    a2(i)=(((1+(2*t2*r(i))^2)/(((1-r(i)^2)^2)+((2*t2*(r(i))^2))))^0.5;
    a3(i)=(((1+(2*t3*r(i))^2)/(((1-r(i)^2)^2)+((2*t3*(r(i))^2))))^0.5;
    a4(i)=(((1+(2*t4*r(i))^2)/(((1-r(i)^2)^2)+((2*t4*(r(i))^2))))^0.5;
    a5(i)=(((1+(2*t5*r(i))^2)/(((1-r(i)^2)^2)+((2*t5*(r(i))^2))))^0.5;

end

plot(r,a1,'b')
axis([0 2 0 5])
hold

plot(r,a2,'r')
plot(r,a3,'c')
plot(r,a4,'g')
plot(r,a5,'y')

xlabel('Frequencia relativa')
ylabel('Deslocamento relativo')
title('Deslocamento de transmissibilidade')
xlabel('Frequencia relativa')

```

## Apêndice 5: Software Vibrações em Visual Basic 6.0.

```
'Programa Absorvedor
```

```
'Entradas:nenhuma
```

```
'Saídas:nenhuma
```

```
'descrição: Este programa realiza a interface do usuário com
```

```
'o absorvedor de vibrações.
```

```
' Variáveis globais para a subrotina leitura
```

```
Const STARTSOURCE = DatsSoftware
```

```
Const STOPSOURCE = DatsScanCount
```

```
Dim conv_buffer(2)
```

```
Dim conv_buffer1(2)
```

```
Dim buffer(2) As Integer
```

```
Dim scales(2)
```

```
Dim offset(2)
```

```
Dim Gains(2) As Long
```

```
Dim Flags(2) As Long
```

```
Dim active As Long
```

```
Dim retCount As Long
```

```
Dim comprimento
```

```
Dim escala(14)
```

```
"Variáveis globais para a subrotina saída
```

```
Const CHANCOUNT = 2
```

```
Dim out_two
```

```
Dim channels(CHANCOUNT) As Long
```

```
Dim device(CHANCOUNT) As Long  
Dim flt_vlt(CHANCOUNT)  
Dim cnt_vlt(CHANCOUNT) As Integer  
Dim conts(CHANCOUNT) As Long
```

```
'Variáveis globais para a subrotina armaonda  
Dim handle As Long  
Const counts! = 1000  
Const signal0 = DdwtSine  
Const amp0 = 18      'amplitude Vpp  
Const off0 = 0       'offset from 0  
Const duty0 = 50     'duty cycle in % of total signal  
Const phase0 = 0     'phase shift in % of cycle  
Dim freq  
Dim controle1  
Dim maxVolt  
Dim minVolt  
Dim Chans(1) As Long  
Dim buf0(counts) As Integer  
Dim i  
Dim openDevice As String  
Dim compMask As Long  
Dim deviceName As String  
Dim deviceType(2)  
Dim manual  
Dim lo1  
Dim me1  
Dim b
```

'Função escrita  
 'Entradas:out\_two  
 'Saídas:nenhuma  
 'Descrição: Esta função escreve no canal de saída analógica 1  
 'a tensão em volts out\_two

Sub escrita(out\_two)

```
channels(0) = 0: channels(1) = 1
flt_vlt(1) = out_two
device(0) = DddtLocal: device(1) = DddtLocal
```

```
If (compMask And daq10V) Then
  maxVolt = 10
  minVolt = -10
End If
For i = 1 To CHANCOUNT - 1
  conts(i) = Abs(((flt_vlt(i) - minVolt) * 65535 / (maxVolt - minVolt)))
  If conts(i) < 32768 Then
    cnt_vlt(i) = conts(i)
  Else
    cnt_vlt(i) = conts(i) - 65536
  End If
  Ret = VBdaqDacSetOutputMode(handle, DddtLocal, i, DdomVoltage)
Next i
```

```
'start output
Ret = VBdaqDacWt(handle, DddtLocal, 1, cnt_vlt(1))
```

Exit Sub

End Sub

'Função leitura

'Entradas:nenhuma

'Saídas:buffer()

'Descrição: Esta função executa a leitura dos canais 0 e 1 SE e armazena

'a leitura em buffer().

Sub leitura()

Dim controle2

me1 = 0

controle2 = 0

lo1 = 0

Gains(0) = DgainX4; Gains(1) = DgainX4

Flags(0) = DafUnipolar; Flags(1) = DafUnipolar

channels(0) = 0; channels(1) = 1

Ret = VBdaqAdcSetMux(handle, 0, 1, DgainX4, DafUnipolar)

Ret = VBdaqAdcSetFreq(handle, 100)

Ret = VBdaqAdcSetAcq(handle, DaamNShot, 1, 1)

Ret = VBdaqAdcTransferSetBuffer(handle, buffer(), 1, DatmUpdateSingle +  
DatmCycleOn)

Ret = VBdaqSetTriggerEvent(handle, STARTSOURCE, 0, channels(0), Gains(0),  
Flags(0), DaqTypeAnalogLocal, 0, 0, DaqStartEvent)

Ret = VBdaqSetTriggerEvent(handle, STOPSOURCE, 0, channels(0), Gains(0),  
Flags(0), DaqTypeAnalogLocal, 0, 0, DaqStopEvent)

Ret = VBdaqAdcTransferStart(handle)

```

Ret = VBdaqAdcArm(handle)
Ret = VBdaqAdcSoftTrig(handle)
Do
    Ret = VBdaqAdcTransferGetStat(handle, active&, retCount&)
Loop Until (active And 1) = 0
Ret = VBdaqAdcDisarm(handle)

```

```
If buffer(1) > 6500 And buffer(1) < 16500 Then
```

```
    VScroll1.Value = buffer(1)
```

```
End If
```

```
If buffer(0) > 1500 And buffer(0) < 12000 Then
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
'Função armaonda
```

```
'Entradas:nenhuma
```

```
'Saídas:nenhuma
```

```
'descrição: Esta funçãoarma e executa uma onda senoidal conforme
```

```
'especificado nas variáveis globais.
```

```
Sub armaonda()
```

```
freq = Text1.Text
```

```
Ret = VBdaqDacSetOutputMode(handle, DddtLocal, 0, DdomStaticWave)
```

```
Ret = VBdaqDacWaveSetTrig(handle, DddtLocal, 0, Ddt$Immediate, 1)
```

```
Ret = VBdaqDacWaveSetClockSource(handle, DddtLocal, 0, DdcsDacClock)
```

```

Ret = VBdaqDacWaveSetFreq(handle, DddtLocal, 0, (freq * counts)) 'output
frequency = clock freq/buffersize
Ret = VBdaqDacWaveSetMode(handle, DddtLocal, 0, DdwmlInfinite, 1000)
If (compMask And daq10V) Then
maxVolt = 10 'voltage range for Daq2K is +/-10V
minVolt = -10
End If
'waveform settings
Ret = VBdaqDacWaveSetPredefWave(handle, DddtLocal, 0, signal0, (65535 *
amp0 / (maxVolt - minVolt)), (65535 * (off0 - minVolt) / (maxVolt - minVolt)), duty0,
phase0)
'buffer settings
Ret = VBdaqDacWaveSetBuffer(handle, DddtLocal, 0, buf0(), counts,
DdtmCycleOn)
'begin output
Ret = VBdaqDacWaveArm(handle, DddtLocal)

End Sub

```

'Função desarma onda  
'Entradas:nenhuma  
'Saídas:nenhuma  
'descrição: Esta função desarma a onda senoidal.

```

Sub desarmaonda()
Ret = VBdaqDacWaveDisarm(handle, DddtLocal)

End Sub

```

'Função Command1\_Click()

'Entradas:nenhuma  
 'Saídas:nenhuma  
 'Descrição:'Essa sub função comanda o botão "stop(vermelho)", isto é,  
 'quando o valor do botão start é falso e somente o botão  
 'stop está habilitado, a cor do botão stop fica vermelho opaco  
 'e a do botão start, verde brilhante. Além disso, quando o valor  
 'do botão start é falso, a função armaonda é chamada.

```
Private Sub Command1_Click()
  Command2.Value = False
  Command2.Enabled = True
  Command1.Enabled = False
  Command1.BackColor = &HC000&
  Command2.BackColor = &HFF&
  controle1 = 1
  Call armaonda

End Sub
```

'Função Command2\_click()  
 'Entradas:nenhuma  
 'Saídas:nenhuma  
 'Descrição: Essa sub função comanda o botão "start(verde)", isto é,  
 'quando o valor do botão stop é falso e somente o botão  
 'start está habilitado, a cor do botão start fica verde opaco  
 'e a do botão stop, vermelho brilhante.Além disso, quando o  
 'valor do botão stop é falso, a função desarmaonda é chamada.

```
Private Sub Command2_Click()
```

```
Command1.Value = False  
Command1.Enabled = True  
Command2.Enabled = False  
Command2.BackColor = &HC0&  
Command1.BackColor = &H80FF80  
Call desarmaonda  
controle1 = 0
```

```
End Sub
```

```
'Função Command3_Click()  
'Entradas:nenhuma  
'Saídas:nenhuma  
'descrição: essa sub função estará sempre habilitada quando o  
'usuário inicia o programa, isto é, o modo manual e  
'os botões "diminui","0","aumenta" estarão sempre  
'habilitados no começo, porém com os motores desligados.
```

```
Private Sub Command3_Click()  
Call escrita(0)
```

```
HScroll2.DragMode = 0  
Option1.Value = True  
Option2.Value = False  
manual = 1  
Command5.Enabled = True  
Command6.Enabled = True  
Command7.Enabled = True
```

```
End Sub
```





```
'Função Command4_Click()  
'Entradas:nenhuma  
'Saídas:nenhuma  
'descrição: essa sub função só funciona quando o modo manual está  
'desativado, isto é, o usuário clicou no botão "auto" do  
'do programa, porém com os motores desligados.Assim, os  
'botões:"diminui", "0","aumenta" ficarão desabilitados.
```

```
Private Sub Command4_Click()  
HScroll2.DragMode = 0
```

```
Option1.Value = False  
Option2.Value = True  
manual = 0  
Command5.Enabled = False  
Command6.Enabled = False  
Command7.Enabled = False  
Call escrita(0)
```

```
End Sub
```

```
'Função Command5_Click()  
'Entradas:nenhuma  
'Saídas:nenhuma  
'descrição:essa sub função só funciona para o modo manual,ela  
'chama a função escrita e aciona os motores no sentido  
'de diminuir os valores na viga, quando o botão  
'"diminui" é acionado pelo usuário.
```

```
Private Sub Command5_Click()  
b = 10
```

```
Call escrita(b)
```

```
End Sub
```

```
'Função Command6_Click()  
'Entradas:nenhuma  
'Saídas:nenhuma  
'descrição:essa sub função só funcioan para o modo manual, ela  
'chama a função escrita e desliga os motores assim  
'que o usuário aciona o botão "0".
```

```
Private Sub Command6_Click()  
b = 0  
Call escrita(b)
```

```
End Sub
```

```
'Função Command7_Click()  
'Entradas:nenhuma  
'Saídas:nenhuma  
'descrição:essa sub função só funciona para o modo manual,ela  
'chama a função escrita e aciona os motores no sentido  
'de aumentar os valores na viga, quando o botão  
"aumenta"é acionado pelo usuário.
```

```
Private Sub Command7_Click()  
b = -10  
Call escrita(b)
```

```
End Sub
```

'Função Load  
 'Entradas:nenhuma  
 'Saídas:nenhuma  
 'descrição: Esta função ocorre sempre que o programa é acionado.  
 'Define suas variáveis iniciais e inicializa a DaqBoard2000.

```
Private Sub Form_Load()
```

```
  controle1 = 0
```

```
  manual = 1
```

```
  freq = 10
```

```
  Command2.BackColor = &HC0&
```

```
  HScroll2.DragMode = 1
```

```
  Option1.Value = True
```

```
  Option2.Value = False
```

```
  Chans(0) = 0:
```

```
  deviceType(0) = DddtLocal: deviceType(1) = DddtLocal
```

```
  handle = -1
```

```
  compMask = daq2000AO Or daqbrd Or daqBrd112 Or daqBrd216
```

```
  openDevice = GetDeviceName(compMask, deviceName)
```

```
  handle = VBdaqOpen(deviceName)
```

```
  Call leitura
```

```
End Sub
```

'Função HScroll2\_Change

'Entradas:nenhuma

'Saídas:nenhuma

'descrição:essa sub função somente altera os valores do label

'da barra da posição pretendida.

```
Private Sub HScroll2_Change()
Label13.Caption = HScroll2.Value
End Sub
```

```
'Função Timer1_Timer()
'Entradas:nenhuma
'Saídas:nenhuma
'descrição: essa sub função calcula o comprimento, altera os valores
'e faz o controle automático.
```

```
Private Sub Timer1_Timer()
```

```
Dim conta
```

```
Dim a
```

```
Dim c
```

```
Dim d
```

```
Dim sup
```

```
Dim inf
```

```
Dim comp
```

```
comprimento = (0.8662 / (((Text1.Text * 6.2831) ^ 2) * 0.114)) ^ (1 / 3)
```

```
If comprimento > 0 Then
```

```
Text2.Text = comprimento * 1000
```

```
Else
```

```
Text2.Text = 0
```

```
comp = 0
```

```
End If
```

```
HScroll2.Value = Text2.Text
```

Call leitura

sup = comprimento + 5

inf = comprimento - 5

d = ((19529 - buffer(0)) / 309.6) \* 10

If b = -10 Then

Text3.Text = d - 20

Else

Text3.Text = d

End If

a = Text3.Text - Text2.Text

HScroll1.Value = Text3.Text

If manual = 0 Then

If a > 0 Then

b = 10

End If

If a < 0 Then

b = -10

End If

Call escrita(b)

End If

Call polyval

End Sub

```
'Função Vscroll2_change()
'Entradas:nenhuma
'Saídas:nenhuma
'descrição: Esta função detecta mudança na frequencia do shaker desejada pelo
'usuário e rearma a onda
```

Private Sub VScroll2\_Change()

```
Text1.Text = VScroll2.Value / 100
If controle1 <> 0 Then
    Call desarmaonda
    Call armaonda
End If
```

End Sub

```
'Função Polyval
'Entradas:nenhuma
'Saídas:nenhuma
'descrição: essa função transforma a leitura do sensor na posição
'do absorvedor.
```

Sub polyval()

Dim f

```
If (compMask And daq10V) Then
    maxVolt = 10 'Max voltage for Daq2K is +/-10V
End If
```

```
scales(0) = maxVolt / (65535 - (Flags(0) And DafBipolar) * 16384)
```

```
offset(0) = maxVolt * (Flags(0) And DafBipolar) / 2
```

```
If buffer(0) >= 0 Then
```

```
    conv_buffer(0) = buffer(0) * scales(0) - offset(0)
```

```
Else
```

```
    conv_buffer(0) = Abs(65536 + buffer(0)) * scales(0) - offset(0)
```

```
End If
```

```
f = conv_buffer(0) * 1000 / 2
```

```
End Sub
```

## Referências Bibliográficas

- [1] Hartog, J.P.Den; "Vibrações nos Sistemas Mecânicos"-editora Edgard Blucher-e18.
- [2] Genta, Giancarlo; "Vibration of Structures and Machines"- editora Springer-Verlag.
- [3] Wang, K.W.; Flotow, A.H. Von; Shoureshi, R.; Hendricks, E.W.; Farabee, T.M.; "Active Control of Vibration and Noise"- ASME.
- [4] Driemeier, Larissa; Alves, Marcílio; "Laboratório de Vibrações e Sistemas Fluidomecânicos – PMC 463"- Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo.
- [5] Ogata, K. Modern Control Engineering, Prentice Hall, Third Edition, 1997.
- [6] Cabral, Eduardo Lustosa; De Barros, Ettore Apolônio; Horikawa, Oswaldo; Curi, Ricardo – "PMC-503 – Laboratório de Automação" , Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo.
- [7] Maruyama, Newton – "QuickStart Guide – LabView".
- [8] Internet: [http://precnt.prec.kyoto-u.ac.jp/matsuhisalab/home\\_en.html](http://precnt.prec.kyoto-u.ac.jp/matsuhisalab/home_en.html)  
<http://aml.mechatronik.uni-linz.ac.at/staff/josef/research/bath0901.pdf>  
<http://thesis.library.adelaide.edu.au/adt-SUA/uploads/approved/adt-SUA20010220.212153/public/02whole.pdf>  
<http://www.allmech.tuwien.ac.at/institute/members/MarkusHochrainer/dir-0/dir-1/lcsv2001.pdf>  
[http://www.adams.com/news/events/userconf/korea/2001/paper/KAUC\\_21.pdf](http://www.adams.com/news/events/userconf/korea/2001/paper/KAUC_21.pdf)  
<http://www.nd.edu/~quake/benchmarks/bench2conf/seto3.html>  
<http://mec2.tm.chiba-u.ac.jp/~nism/gyousekie.html>  
<http://www.enidine.com/Glossary.html>  
<http://www.allmech.tuwien.ac.at/institute/members/MarkusHochrainer/dir-0/dir-1/lcsv2001.pdf>  
<http://www.ifr.mavt.ethz.ch/movic98/proceedings/118.pdf>