

MEDIÇÕES DE COEFICIENTE DE  
AMORTECIMENTO E FORÇA DE LEVITAÇÃO  
EM PROTÓTIPO DE TREM MAGLEV  
SUPERCONDUTOR

RAFAEL DE AMORIM ABREU

*PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.*

Aprovado por:

---

Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing

---

Rubens de Andrade Junior, D.Sc.

---

Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

---

Márcio Feres Bessa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2007

# AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica/Eletrotécnica (DEE) pelo suporte dado ao longo desses anos e pelo legado passado que possibilitaram minha formação como Engenheiro.

Agradeço, em especial, aos seguintes professores pela conduta profissional e caráter especial: Helói José Fernandes Moreira, Richard Magdalena Stephan, Rubens Andrade Junior e Walter Issamu Suemitsu.

Agradeço a Márcio Feres Bessa que me auxiliou a dar o encaminhamento desse trabalho e que apesar do pouco convívio demonstrou seu ótimo caráter.

Agradeço a Guilherme Gonçalves Sotelo toda a ajuda e incentivo quando do momento que mais precisava na etapa final da formação sempre se mostrando um grande amigo.

Agradeço aos meus amigos: Antonio Augusto Brites Magalhães, Patrícia Pereira, Vanessa Carvalho, Karla Krispina, Jan Thomas, Daniel Curvello, Thiago Barata, Adriano Araújo, Fábio Cícero, Carlos Capanema, Gustavo Oliveira, Rodrigo Justen e Raphael Araújo por todos os momentos vividos e suportados e por fazer dessa época de faculdade uma passagem tão especial.

Por fim, agradeço minha família por todo amor e apoio despejados ao longo da trajetória acadêmica e da vida.

# RESUMO

Rafael de Amorim Abreu  
UFRJ – Escola Politécnica

Projeto de Graduação  
Julho de 2007

## MEDIÇÕES DE OSCILAÇÕES E FORÇA EM PROTÓTIPO DE TREM MAGLEV SUPERCONDUTOR

Esse trabalho apresenta os resultados para medições de coeficiente de amortecimento e força de levitação em um protótipo de trem MagLev supercondutor encontrado no Laboratório de Aplicações de Supercondutores da UFRJ. As medidas de coeficiente de amortecimento foram realizadas na presença de campo para três alturas de resfriamento diferentes, sendo as mesmas utilizadas para medição de força. Nesse último caso ainda foi realizada uma medição resfriando os supercondutores do protótipo na ausência de campo magnético. Através do estudo comparativo dos resultados obtidos revelou-se o comportamento do protótipo para cada situação, assim como possíveis utilizações do mesmo para demonstração.

# Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>2. Conceitos Básicos</b> .....	2
2.1 Supercondutividade .....	2
2.2 Tipos de Levitação .....	3
<b>3. Teoria da Medição de Oscilações</b> .....	5
3.1 Comportamento do Trem Maglev .....	5
3.2 Técnicas de Levantamento Experimental .....	11
<b>4. Sistemas de Medição de Força e de Oscilações</b> .....	15
<b>5. Procedimento Experimental e Discussão de Resultados</b> .....	17
5.1 Medições de Coeficiente de Amortecimento .....	17
5.2 Medições de Força de Levitação .....	24
<b>6. Conclusões</b> .....	29
<b>Referências</b> .....	30

## Lista de Figuras

2.1 Esquemas de três sistemas MagLev de transporte: (a) EML ou método de atração magnética e (b) EDL ou método de repulsão magnética (c) SML ou levitação supercondutora .....	4
3.1 Sistema massa-mola com amortecimento viscoso .....	5
3.2 Gráfico típico do movimento vibratório amortecido .....	8
3.3 Representação do sistema magnetomecânico trilho – trem .....	8
3.4 Cinco graus de liberdade de movimento no modo de corpo rígido: a) vista lateral com o movimento de queda livre ( <i>heave</i> ); b) vista superior com o movimento de deslizamento lateral ( <i>sway</i> ); c) vista lateral com movimento de caturro ( <i>pitch</i> ); d) vista frontal com o movimento de balanço ( <i>roll</i> ); e) vista superior com movimento de cabeceio ( <i>yaw</i> ) .....	10
3.5 Disposição das cargas elétricas em um cristal piezoelétrico puro devido a forças externas de deflexão .....	11
3.6 Representação da estrutura interna de um acelerômetro .....	12
3.7 Esquema de montagem do sistema de medição .....	13
3.8 Forma de onda gerada na saída do acelerômetro .....	14
4.1 Sistema de medição de força .....	15
4.2 Sistema de medição de oscilações .....	16
5.1 Vista superior da posição dos blocos supercondutores nos criostatos .....	17
5.2 Protótipo de trem MagLev sobre os trilho de NdFeB .....	18
5.3 Gráficos de medição de oscilação vertical com altura de resfriamento de 5mm .....	18
5.4 Gráficos de medição de oscilação horizontal com altura de resfriamento de 5mm .....	19
5.5 Gráficos de medição de oscilação vertical com altura de resfriamento de 7mm .....	20
5.6 Gráficos de medição de oscilação horizontal com altura de resfriamento de 7mm .....	21
5.7 Gráficos de medição de oscilação vertical com altura de resfriamento de 9mm .....	23
5.8 Gráficos de medição de oscilação horizontal com altura de resfriamento de 9mm .....	23
5.9 (a) Gráfico resultante da medição de força em zero field cooling e (b) o mesmo gráfico com a força convertida para pressão.....	25
5.10 Gráfico resultante da medição de força em “field cooling“ a 5mm de altura .....	26

5.11 Gráfico resultante da medição de força em “field cooling“ a 7mm de altura .....	27
5.12 Gráfico resultante da medição de força em “field cooling“ a 9mm de altura .....	27
5.13 Gráfico comparativo entre todas as medições de força .....	28

## **Lista de Tabelas**

5.1 Fatores de amortecimento calculados das medidas com altura de resfriamento de 5mm .....	20
5.2 Fatores de amortecimento calculados das medidas com altura de resfriamento de 7mm .....	21
5.3 Fatores de amortecimento calculados das medidas com altura de resfriamento de 9mm .....	22

# 1- Introdução

Os conceitos de supercondutividade são considerados relativamente novos, assim como a tecnologia a ela associada. Por isso, muitos estudos são realizados entre as diversas aplicações dos supercondutores. O Laboratório de Aplicações de Supercondutores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LASUP) se empenha nessa vertente possuindo diversos projetos de aplicação de supercondutividade. Um desses projetos consiste do estudo do trem de levitação magnética (MagLev) por supercondutores. Para tal, um protótipo foi construído a fim de se realizar os mais variados testes. O presente trabalho apresenta dois desses testes, que são a medição de coeficiente de amortecimento e de força de levitação. Estes testes têm como objetivos a melhor compreensão do comportamento do protótipo e sua caracterização.

O trabalho se estrutura da seguinte forma: um capítulo com os conceitos básicos de supercondutividade e dos tipos de levitação. Em seguida é apresentada a teoria da medição de oscilação, em que se discute o comportamento do trem MagLev e a técnica de levantamento experimental. Ainda há um breve capítulo para apresentação das informações básicas do sistema de medição de força, para então serem expostos os procedimentos experimentais e os resultados em si. Por fim, o capítulo com as conclusões derivadas dos testes.

## 2 – Conceitos Básicos

### 2.1 Supercondutividade

De acordo com [1], o termo supercondutividade surgiu quando Karmelinh Onnes, em uma de suas pesquisas, verificou que a resistividade do mercúrio caía repentinamente a zero quando sua temperatura era inferior a uma temperatura crítica ( $T_c$ ) de aproximadamente 4,2K, ou seja, o condutor perdeu totalmente sua resistência.

Contudo, a temperatura crítica  $T_c$  não é o único fator determinante do estado supercondutor. O material só permanece nesse estado ao se manter abaixo de patamares de campo magnético crítico ( $H_c$ ) e de densidade de corrente crítica ( $J_c$ ). Vale ressaltar que os parâmetros  $H_c$  e  $J_c$  são inter-relacionados.

Já em 1933 [2], Meissner e Ochsenfeld verificaram outra importante propriedade supercondutora que é a exclusão total do campo magnético. Tal fenômeno é chamado de diamagnetismo perfeito. Daí em diante, vários materiais supercondutores foram descobertos, todos utilizando o hélio líquido devido à baixa temperatura necessária para atingir o estado supercondutor (abaixo dos 23K). Tais materiais são conhecidos hoje como supercondutores de baixa temperatura crítica (LTS).

Em 1987 foram descobertos materiais capazes de fazer a transição do estado normal para o estado supercondutor na temperatura de 90K. Este fato permitiu a utilização do nitrogênio líquido, que é muito mais barato que o hélio líquido, para fazer o resfriamento. Tais materiais foram denominados supercondutores de alta temperatura crítica (HTS). Grande parte dos HTS, assim como boa parte dos LTS, permite a penetração do campo magnético devido à existência de vórtices de correntes que geram campos magnéticos locais. Essa característica faz destes supercondutores diamagnéticos não perfeitos. Mas é exatamente essa imperfeição que garante a estabilidade para fins de levitação. Outra diferença em relação aos supercondutores que apresentam o diamagnetismo perfeito é a existência de um campo magnético crítico superior ( $H_{c2}$ ) e de um campo magnético crítico inferior ( $H_{c1}$ ). No intervalo de valores de campo entre esses limites se caracteriza o estado misto do supercondutor, o qual é o estado energético mais favorável.



## 2.2 Tipos de Levitação

Existem três formas de levitação do usualmente aplicadas aos trens de levitação. São elas a EML (levitação eletromagnética), EDL (levitação eletrodinâmica) e a SML (Levitação Supercondutora). Como visto em [1] e [3], o sistema de levitação EML se baseia na atração magnética não tendo a necessidade da utilização de supercondutores. Contudo, tal sistema demanda um sofisticado sistema de controle para garantir sua estabilidade. Já o sistema EDL está amparado no princípio da repulsão magnética. A levitação supercondutora baseia-se na repulsão por exclusão parcial do fluxo magnético entre um supercondutor e um ímã permanente. Os esquemas de cada método podem ser observados na figura 2.1.

No método EML, um conjunto de bobinas é usado para produzir a atração magnética responsável pela levitação e outro conjunto de bobinas é utilizado para a propulsão. Por se utilizar um material ferromagnético no trilho, a atração magnética pode ser obtida com um eletroímã convencional, o qual exige um espaço vazio da ordem de um centímetro para o trilho. Quando esse espaço vazio aumenta, a força magnética de atração diminui e vice-versa, o que leva à instabilidade do sistema. Por isso se faz necessário o uso de um eficaz controle da posição para garantir uma estabilização satisfatória do trem durante seu movimento.

Já no método EDL, a repulsão é alcançada a partir de um campo magnético produzido no veículo, o qual induzirá correntes parasitas no trilho de condutores abaixo do veículo. A levitação é alcançada quando o trem atinge uma certa velocidade. Bobinas supercondutoras podem gerar fortes campos magnéticos, da ordem de 2 a 3 Tesla, o que é suficiente para criar um gap de levitação de até 30 cm. O sistema de propulsão se baseia no uso de um motor linear.

Conforme exposto em [4] e [5], a SML garante uma levitação auto-estável verticalmente dada à condição de equilíbrio entre a força de levitação e o peso. Outra característica é a estabilidade lateral, baseada na ancoragem da rede de vórtices de corrente que gera forças restauradoras quando deformada elasticamente a posição de equilíbrio.

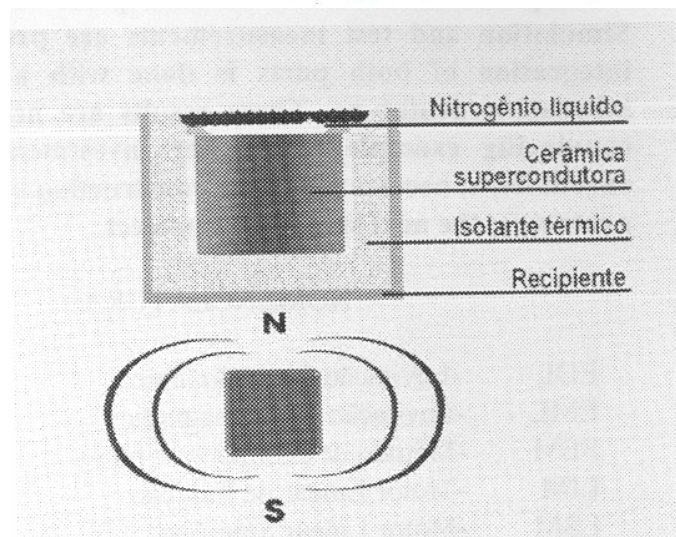
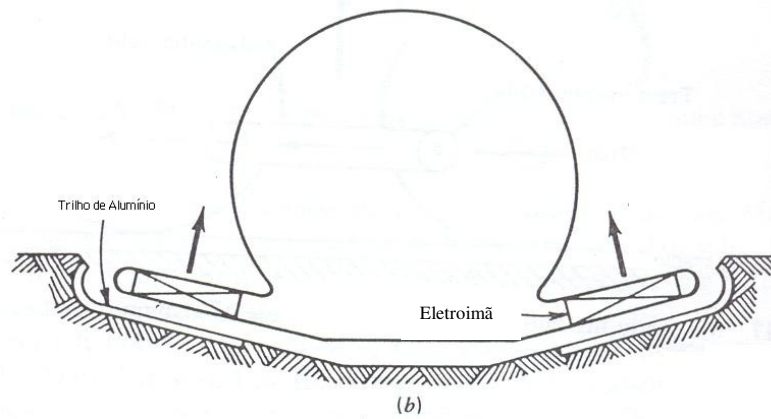
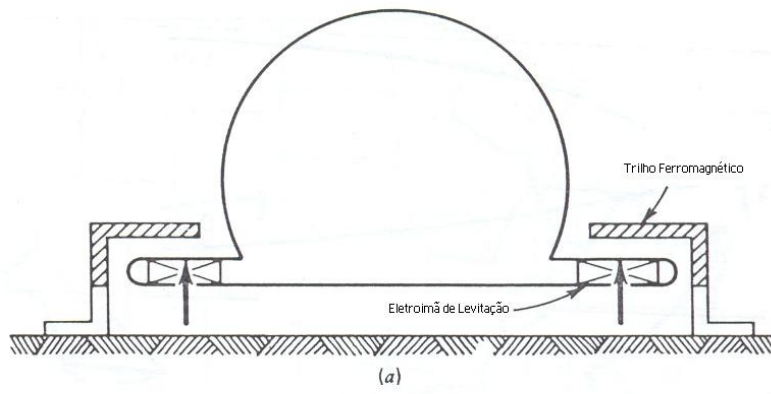


Figura 2.1: Esquemas de três sistemas MagLev de transporte[3,4]: (a) EML ou método de atração magnética e (b) EDL ou método de repulsão magnética (c) SML ou levitação supercondutora

### 3 – Teoria da Medição de Oscilações

#### 4.1 Comportamento do Trem Maglev

Para entendimento do comportamento do trem MagLev diante de perturbações externas, é necessário compreender, primeiramente, a teoria da dinâmica do corpo rígido. Inicialmente, considere um sistema com um grau de liberdade, ou seja, no qual o objeto de estudo se movimenta em apenas uma direção espacial. Baseado em [6], é feita a análise do sistema da figura 3.1, onde um corpo de massa  $m$  está preso ao êmbolo de um cilindro e está suspenso por uma mola de constante elástica  $k$ .

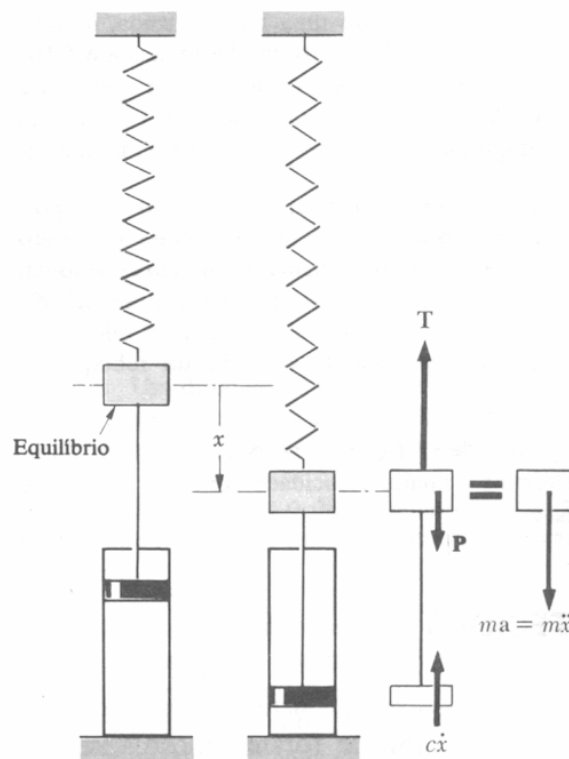


Figura 3.1: Sistema massa-mola com amortecimento viscoso [6]

O módulo da força de atrito exercida sobre o êmbolo pelo fluido que o envolve é igual a  $c\dot{x}$ , sendo  $c$  o coeficiente de amortecimento viscoso [Ns/m], que é uma constante que depende das propriedades do fluido e do cilindro. Dessa forma a equação de movimento é dada por

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \vec{F}(t). \quad (3.1)$$

Se  $\vec{F}(t) = 0$ , tem-se a equação relativa à vibração livre amortecida, expressa por

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.2)$$

Montando a equação característica desta equação diferencial ordinária, obtemos

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0, \quad (3.3)$$

que tem como raízes

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}. \quad (3.4)$$

Sendo  $c_c$  o coeficiente de amortecimento crítico para o qual obtém-se duas raízes reais e iguais na equação 3.4, temos

$$\left(\frac{c_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0 \Rightarrow c_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n, \quad (3.5)$$

onde  $\omega_n$  é a frequência natural do sistema na ausência de amortecimento. Assim configura-se a possibilidade de três casos diferentes de amortecimento, dependendo do valor de  $c$ . São eles:

Amortecimento supercrítico:  $c > c_c$ . As raízes da equação 3.3 são reais e distintas e a solução geral da equação 3.2 é

$$x = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t}, \quad (3.6)$$

que representa um movimento não vibratório. Nesse caso, teoricamente,  $x$  tende a zero (posição de equilíbrio) quando  $t$  tende a infinito, pois  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são ambos negativos. Mas na realidade, o sistema retorna a sua posição inicial após um tempo finito.

Amortecimento crítico:  $c = c_c$ . A equação 3.3 possui duas raízes reais iguais de valor  $\lambda = -\frac{c_c}{2m} = -\omega_n$ , sendo a solução geral dada por

$$x = (A + Bt)e^{-\omega_n t}. \quad (3.7)$$

O movimento resultante é não vibratório. Em tal caso, o sistema retorna à posição de equilíbrio no menor tempo possível, sem qualquer oscilação.

Amortecimento subcrítico:  $c < c_c$ . As raízes da equação 3.3 são complexas e conjugadas, e a solução geral de 3.2 torna-se

$$x = e^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} (A \operatorname{sen} \omega_a t + B \operatorname{cos} \omega_a t), \quad (3.8)$$

onde  $\omega_a$  é a frequência amortecida definida pela relação

$$\omega_a^2 = \frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2. \quad (3.9)$$

A partir das equações 3.5 e 3.9 é possível escrever

$$\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2}, \quad (3.10)$$

onde  $\frac{c}{c_c} = \xi$  é a constante fator de amortecimento. Fazendo uma substituição matemática

na equação 3.8 obtemos a solução geral na forma

$$x = x_m e^{-\xi \omega_n t} \operatorname{sen}(\omega_a t + \phi), \quad (3.11)$$

onde  $\phi = \operatorname{arcsen}\left(\sqrt{1 - \xi^2}\right)$ .

A equação 3.11 define um movimento vibratório com amplitude decrescente, como visto na figura 3.2. Embora o movimento não se repita, o intervalo de tempo  $\tau = \frac{2\pi}{\omega_a}$ , correspondente a dois pontos consecutivos em que a curva descrita pela equação 3.11 toca a curva limite  $C = x_m e^{-\xi \omega_n t}$ , é chamado de período da vibração amortecida.

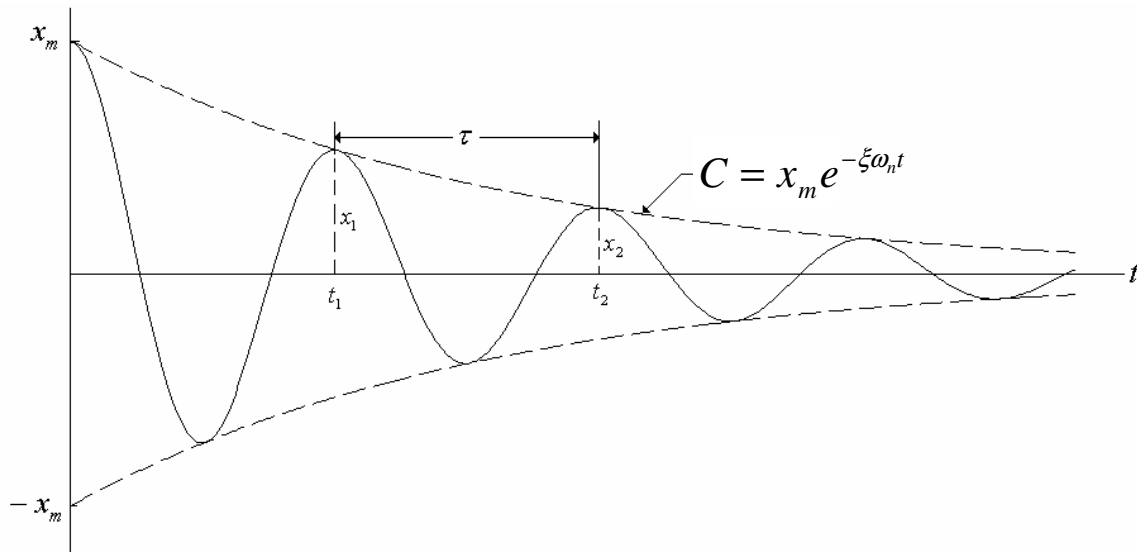


Figura 3.2: Gráfico típico do movimento vibratório amortecido

Considerando o sistema do trem MagLev, que possui dois criostatos com supercondutores para a base do trem como se vê na figura 3.3, podemos representá-lo como um corpo rígido de massa  $m$  sustentado por um par de molas de rigidez  $k$  e um par de amortecedores de coeficiente  $c$  em paralelo, supondo que o fluxo magnético produzido nos dois lados no trilho é igual, fazendo assim que os valores das constantes também sejam iguais. Nesse caso é possível calcular os equivalentes para simplificar o sistema, sabendo que para molas em paralelo  $K = k_1 + k_2$  e para amortecedores em paralelo  $C = c_1 + c_2$ .

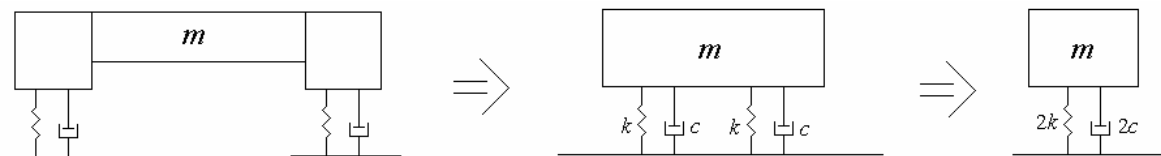


Figura 3.3: Representação do sistema magnetomecânico trilho – trem

Por se tratar de uma força magnética que atua para se opor à força da gravidade, a constante  $k$  se chama rigidez magnética e se comporta analogamente a rigidez elástica na maioria dos casos. Porém, atenção deve ser prestada devido à natureza histerética e de outras não linearidades presentes em sistemas magnetomecânicos como esse.

O comportamento dinâmico também deve ser levado em consideração, pois o sistema a ser estudado não se limita a oscilações com um grau de liberdade. Por se tratar de um problema de levitação de um corpo rígido com um movimento de translação em relação a um anteparo fixo, a energia cinética acumulada nesse movimento pode acoplar-se com outros modos de movimentos, o que pode acarretar grandes oscilações e falhas [3].

Portanto, um sistema MagLev deve atender certos parâmetros para ser considerado confiável, os quais são: garantir que o sistema de levitação compense a força gravitacional, o sistema permaneça estável diante de pequenas perturbações dinâmicas, o sistema permaneça estável em breves perturbações dinâmicas contundentes e finalmente que o sistema possua um amortecimento capaz de garantir uma boa qualidade de viagem aos passageiros ou carga.

Em sistemas MagLev, tanto modos de vibração de corpo rígido como modos de vibração elástica geram graus de liberdade de movimento. Dessa forma, o sistema possui mais de seis graus de liberdade de movimento, porém, aqui são citadas apenas as vibrações em cinco graus de liberdade de movimento do modo de corpo rígido. O sexto grau de liberdade do trem é um movimento permitido, já que é a direção de deslocamento do trem. Deve-se lembrar que esses movimentos podem se acoplar, gerando maiores instabilidades. Os movimentos do modo de corpo rígido podem ser vistos na figura 3.4 e são os seguintes [2,7]:

#### - Movimentos Lineares

*Queda Livre (heave)*: movimento na direção da gravidade;

*Deslizamento lateral (sway)*: movimento no plano normal a gravidade.

#### - Movimentos Rotativos

*Caturro (pitch)*: rotação em torno do eixo lateral;

*Balanço (roll)*: rotação em torno do eixo longitudinal do trem;

*Cabeceio (yaw)*: rotação em torno do eixo alinhado com a gravidade.

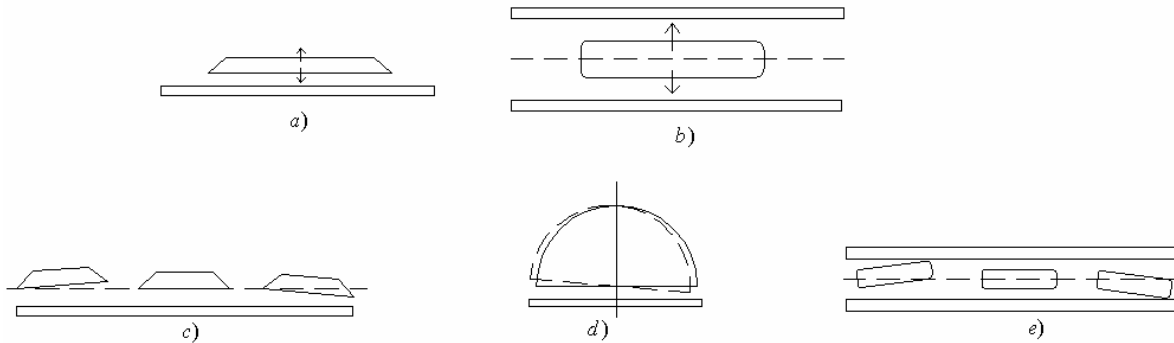


Figura 3.4: Cinco graus de liberdade de movimento no modo de corpo rígido: a) vista lateral com o movimento de queda livre (*heave*); b) vista superior com o movimento de deslizamento lateral (*sway*); c) vista lateral com movimento de caturro (*pitch*); d) vista frontal com o movimento de balanço (*roll*); e) vista superior com movimento de cabeceio (*yaw*)

Em estudos já realizados com protótipos de escala real, foram observadas instabilidades como queda livre, queda livre acoplada com caturro e movimento de deslizamento lateral acoplado com cabeceio. Por isso, o que está mais em voga atualmente são estudos para garantir a boa qualidade de viagem do trem, para que caso ocorram tais instabilidades, elas sejam rapidamente removidas. Para tanto é necessário garantir um alto fator de amortecimento. Contudo, em outros estudos foi verificado que o amortecimento diminui com o aumento da velocidade, o que quer dizer que por vezes o uso de um controlador ativo seja necessário para garantir a boa qualidade de viagem em sistemas de escala real.

### 3.2 - Técnicas de Levantamento Experimental

Para se fazer a aquisição de dados de vibração do protótipo são usados acelerômetros (medidores de vibração) acoplados a um condicionador de sinais, o qual é ligado ao osciloscópio que fornece o sinal de saída. Como se pode encontrar em [8] e [9], para se garantir um sinal de saída de precisão, atualmente são usados acelerômetros que se baseiam no efeito piezoelétrico. Quando um material (cristal puro ou cerâmico) piezoelétrico sofre uma tensão causada por uma força externa, cargas elétricas se distribuem em cada face do material, gerando uma diferença de potencial entre os terminais de cada face proporcional a força aplicada. A figura 3.5 ilustra essa distribuição de cargas.



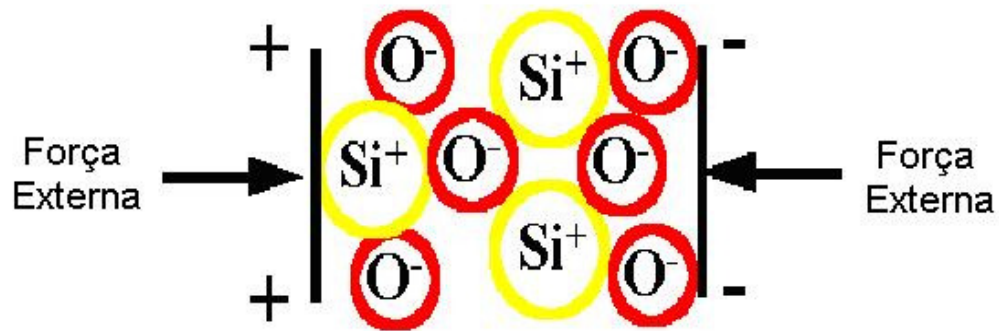


Figura 3.5: Disposição das cargas elétricas em um cristal piezoelétrico puro devido a forças externas de deflexão[8].

Devido a alta rigidez do material piezoelétrico, o mesmo é capaz de gerar uma diferença de potencial significativa proveniente de forças tensionadoras de baixas intensidades. Esse fato garante uma alta sensibilidade e precisão do sinal de saída. Para se ter uma idéia, acelerômetros construídos com tal material são capazes de medir acelerações da ordem dez mil vezes menor que a aceleração da gravidade até 100 vezes maior que a aceleração da gravidade.

Na figura 3.6, vemos a estrutura interna de um acelerômetro. A parte externa pontilhada é o encapsulamento do sensor. O cristal piezoelétrico está hachurado na diagonal. No meio do cristal piezoelétrico está o eletrodo onde as cargas são acumuladas, o qual é representado completamente hachurado, enquanto que o micro-circuito de transistores que condiciona o sinal de saída está representado em hachuras horizontais. A massa de valor  $M$  está representada em hachuras verticais. Tal massa é forçada pelo cristal a seguir o movimento da base e da estrutura a qual está presa. Respeitando a faixa de frequência de operação do acelerômetro, o valor da aceleração sai aplicando-se a Segunda Lei de Newton, já que o total de carga acumulada é proporcional à força aplicada, e esta última é proporcional à aceleração.

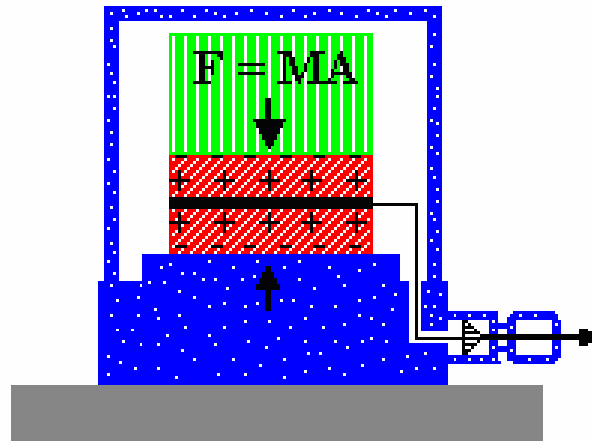


Figura 3.6: Representação da estrutura interna de um acelerômetro[8].

O sinal de carga acumulada gerado pelo cristal piezoelétrico que chega aos eletrodos é de alta impedância. Sendo assim, é necessário um tratamento do mesmo para poder ser observado. Isso é feito pelo condicionador de sinal, que pode ser externo ou embutido dentro do acelerômetro. Em nosso caso, foram utilizados acelerômetros ICP® (*Integrated Circuit – Piezoelectric* ou Piezoelétrico com Circuito Integrado) que já possuem o condicionador de sinal integrado à sua estrutura. Esse condicionador será responsável por converter o sinal de alta impedância em um sinal de baixa impedância que poderá ser transmitido por cabos coaxiais à um aparelho medidor de tensão. Além disso, o condicionador pode amplificar ou atenuar e até filtrar o sinal de saída. Contudo, o micro-circuito integrado necessita de uma corrente CC regulada de alimentação. Alguns aparelhos medidores vêm com fontes embutidas para operar essa função. Porém, por não dispormos de tais aparelhos, usamos um condicionador de sinal externo para suprir a corrente para o micro-circuito. O esquema de montagem do sistema de medição pode ser visto na figura 3.7.



Figura 3.7: Esquema de montagem do sistema de medição[9]

No nosso caso do estudo da oscilação do trem Maglev diante de uma força externa aplicada, a forma de onda do sinal de saída gerada pelo acelerômetro é dada pela equação de vibração amortecida análoga a equação 3.11, a qual é [10,11,12,13]

$$a = Ae^{-\xi\omega_n t} \text{sen}(\omega_a t + \phi), \quad (3.12)$$

onde  $a$  é a aceleração,  $\xi$  é o fator de amortecimento,  $\omega_n$  é a frequência natural de oscilação,  $\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$  é a frequência amortecida,  $\phi = \arcsen(\sqrt{1 - \xi^2})$  é o ângulo de fase e  $A$  é a amplitude. O gráfico referente à equação 4.11 está ilustrado na figura 4.8.

Para se determinar a quantidade de amortecimento de um sistema é comumente usada a medida de taxa de decréscimo das oscilações livres. Para tanto é usada a expressão do decremento logarítmico que é definida como o logaritmo natural do quociente de duas quaisquer amplitudes máximas locais consecutivas. A equação do decremento logarítmico é

$$\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}. \quad (3.13)$$

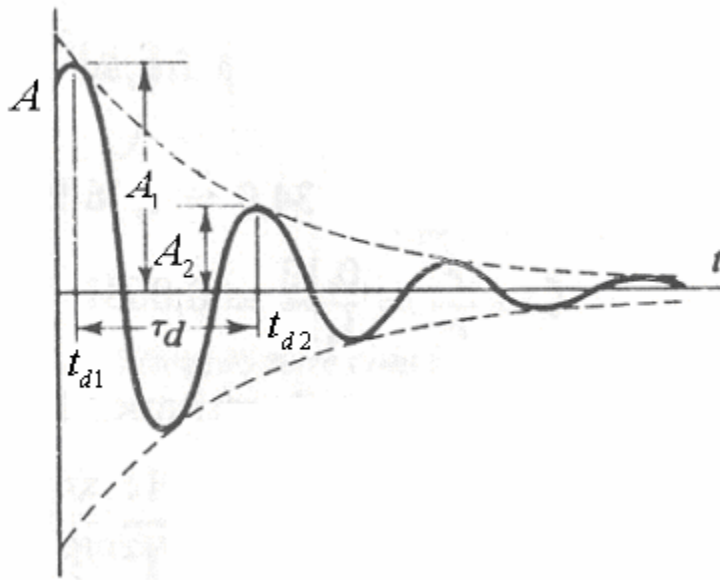


Figura 3.8: Forma de onda gerada na saída do acelerômetro

Conforme visto em [14] pode-se montar um algoritmo para obtenção dos parâmetros da equação 3.12.

ALGORITMO 1:

(1) A partir da figura 3.8, define-se  $d = \frac{A_2}{A_1}$  e  $\tau_d = t_{d2} - t_{d1}$ ;

(2) Calcula-se  $\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{2\pi}{\ln(d)} \right]^2}}$ ;

(3) Calcula-se  $\omega_n = \frac{2\pi}{\tau_d \sqrt{1 - \xi^2}}$ ;

## 4 – Sistemas de Medição de Força e de Oscilações

O sistema de medição de força do LASUP consiste de uma mesa com uma guia vertical acionada por um motor de passo. A essa guia são acoplados uma célula de carga e uma sapata do protótipo de trem MagLev que têm liberdade de se movimentar somente na direção vertical. A célula de carga gera uma tensão proporcional à força aplicada em seu eixo. Esse sinal de tensão é enviado a uma placa de conversão AD/DA que é responsável pela digitalização do sinal, possibilitando automatizar a tomada de dados através de controle computacional. O motor de passo é acionado via computador o que proporciona total controle da velocidade e da distância percorrida na medição. A tomada de dados e o acionamento do motor de passo são conjuntamente controlados via ferramenta Simulink do MatLab. Um trecho do trilho de ímãs de NdFeB é fixado na base da mesa. Os ímãs são montados de tal forma a concentrar o fluxo, gerando um forte campo magnético. A figura 4.1 ilustra o sistema, que foi desenvolvido por Guilherme Gonçalves Sotelo com auxílio de Ocione José Machado. Maiores detalhes desse sistema podem ser encontrados em [15]. Um sistema similar é descrito em [16] e [17].

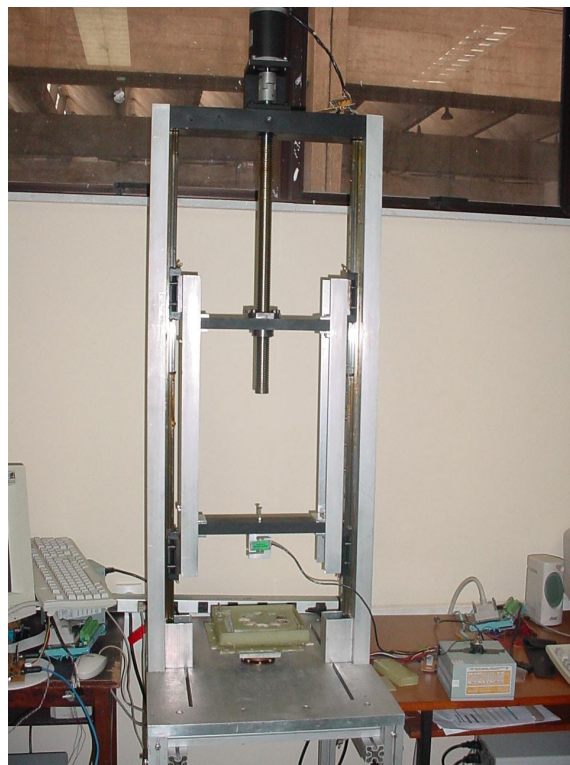


Figura 4.1: Sistema de medição de força

Como exposto em [18] e [19], a força de levitação varia de acordo com a intensidade e com o gradiente do campo magnético a que o supercondutor está submetido. Junto a isso há o fato do comportamento dos vórtices de corrente surgidos no supercondutor alterarem o fluxo aprisionado de acordo com a movimentação do protótipo o que acarreta em um comportamento histerético da força.

O sistema de medição de oscilações é visto na figura 4.2, consistindo de acelerômetros, um condicionador de sinais externo e um osciloscópio. A comunicação entre o condicionador de sinais externo e o osciloscópio é feita a partir de cabos coaxiais BNC-BNC. Os dados observados no osciloscópio são salvos através de disquetes de 3"1/4.

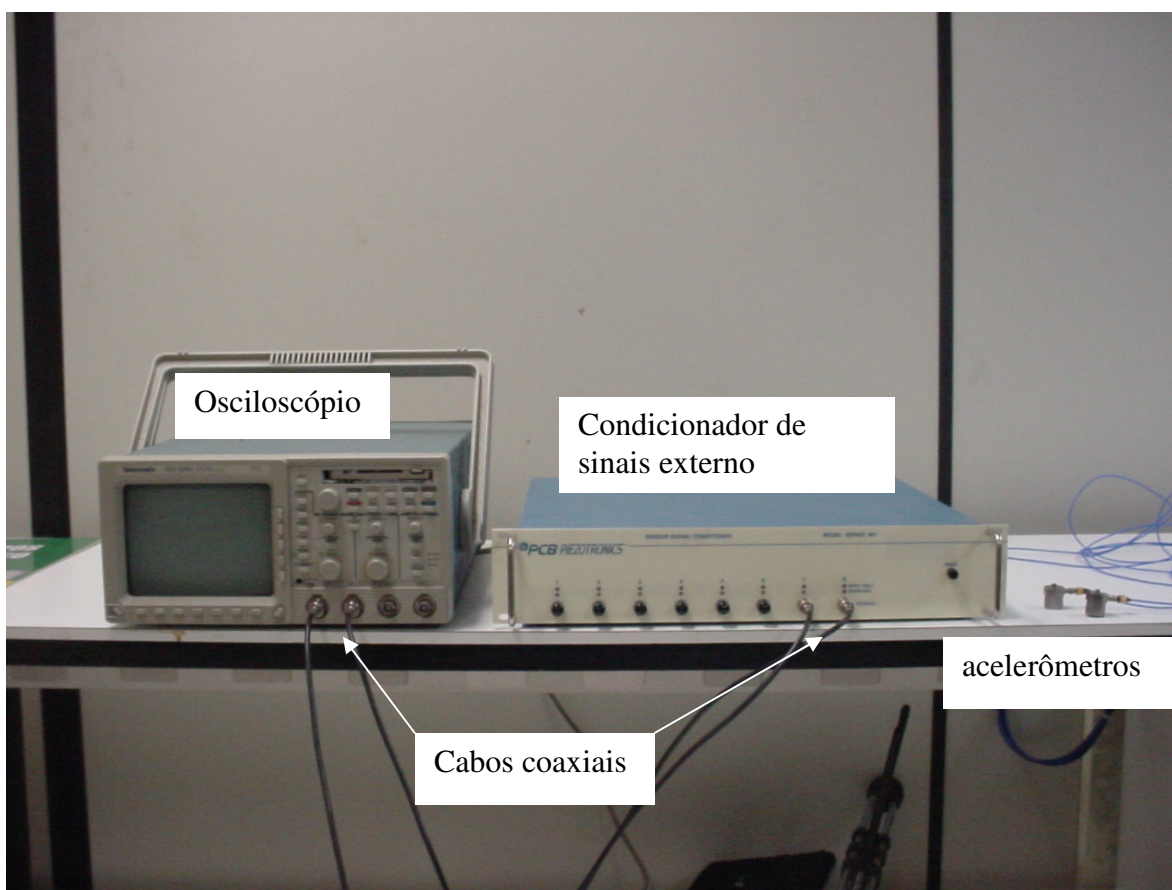


Figura 4.2: Sistema de medição de oscilações

## 5 – Procedimento Experimental e Discussão de Resultados

### 5.1 Medições de Coeficiente de Amortecimento

As primeiras medidas realizadas foram as de coeficiente de amortecimento. Para tal foi utilizado um pedaço de isopor para bater no trem e causar a oscilação na direção desejada. O protótipo de trem maglev completo foi montado com os dois criostatos e estrutura de ligação dos mesmos. Cada criostato possui uma parede externa de 1mm de espessura. Os supercondutores de YBaCuO não se encontram por toda extensão da estrutura, sendo distribuídos em dois grupos, um na parte frontal e outro na traseira. A área de cada bloco de supercondutores é de  $0,00275\text{m}^2$  ( $4,1\text{cm} \times 6,7\text{cm}$ ), o que resulta em uma área total de  $0,0055\text{m}^2$ . A figura 5.1 ilustra a posição dos blocos supercondutores em cada criostato. A fonte de campo magnético utilizada foi o trilho de ímãs de NdFeB. Na figura 5.2, observa-se o protótipo sobre a pista com os trilhos. O processo de “field cooling”, que consiste em resfriar as cerâmicas na presença de campo magnético até alcançarem o estado supercondutor, foi utilizado para a realização dessa experiência. A primeira altura escolhida para resfriamento foi 5mm, não havendo relaxamento de altura após a retirada das peças para sustentação do protótipo enquanto as pastilhas não atingissem o estado supercondutor. Foram então realizadas três medidas de oscilação vertical e três de oscilação horizontal. Os gráficos obtidos podem ser observados nas figuras 5.3 e 5.4.

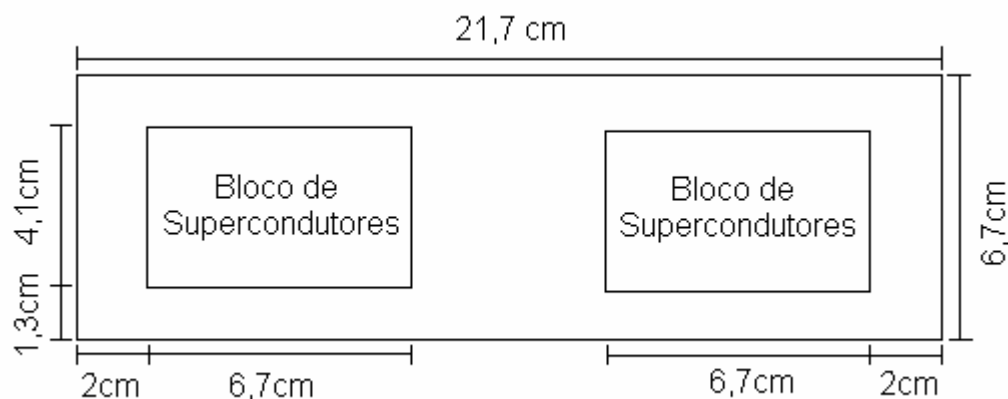


Figura 5.1: Vista superior da posição dos blocos supercondutores nos criostatos



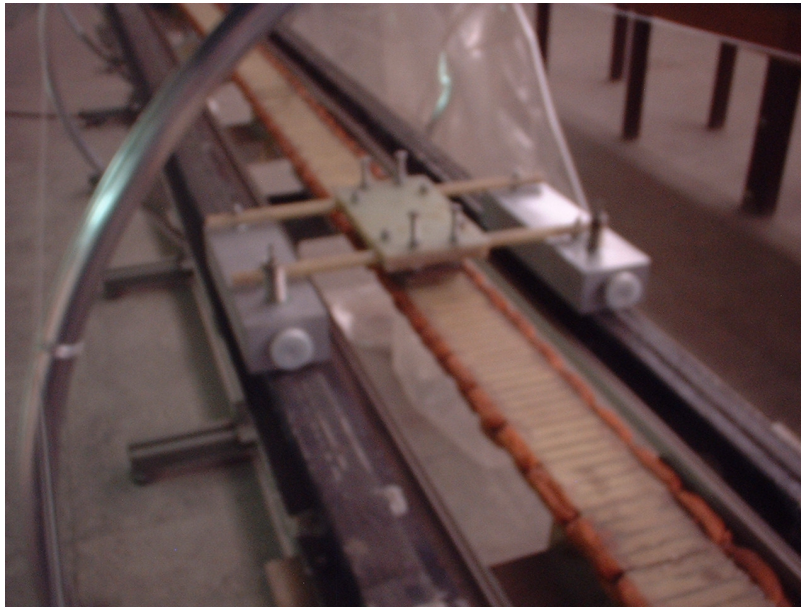


Figura 5.2: Protótipo de trem MagLev sobre os trilhos de ímãs de NdFeB

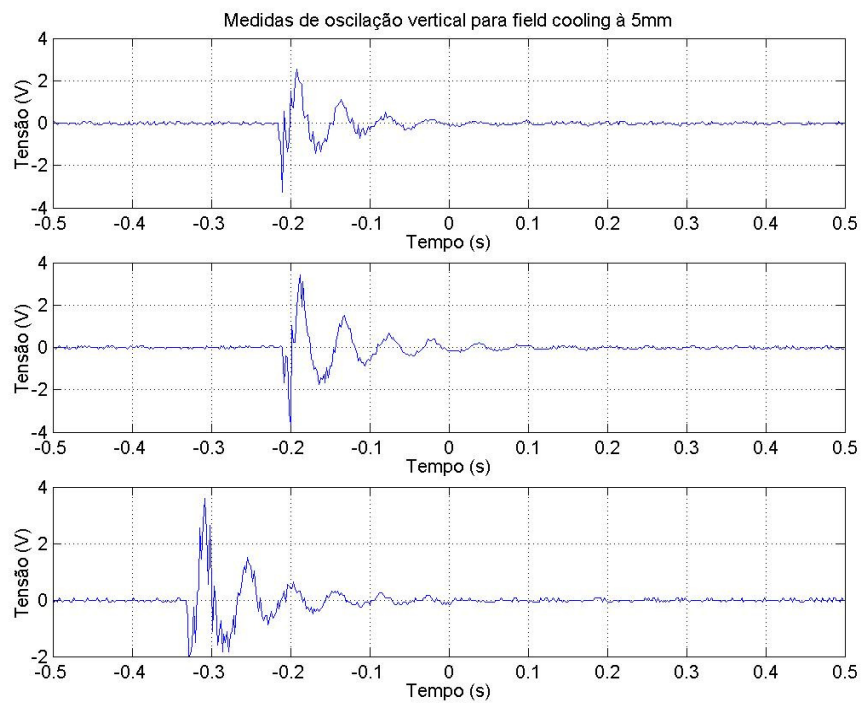


Figura 5.3: Gráficos de medição de oscilação vertical com altura de resfriamento de 5mm



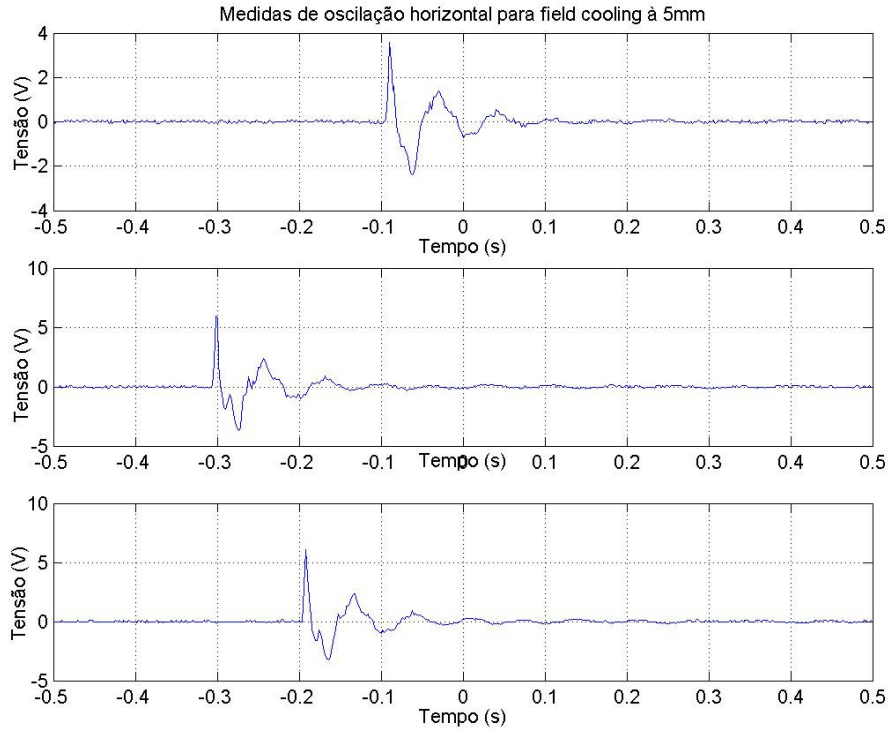


Figura 5.4: Gráficos de medição de oscilação horizontal com altura de resfriamento de 5mm

Conforme exposto no algoritmo 1 do item 3.2, a medida do fator de amortecimento é obtida a partir de um cálculo que envolve o valor de duas máximas amplitudes consecutivas. Decidiu-se então fazer um cálculo do amortecimento utilizando o primeiro e segundo máximos de amplitude e outro com o segundo e terceiro máximos consecutivos, a fim de confirmar a qualidade das medições. A tabela 5.1 mostra os fatores de amortecimento calculados a partir do algoritmo 1. A média do fator de amortecimento vertical para esse caso foi de 0,1289. Já a média do fator de amortecimento horizontal foi de 0,1487.

A segunda altura escolhida foi 7mm. Após a retirada das peças de sustentação houve um relaxamento de 1mm, fazendo que o protótipo levitasse a 6mm de altura. Foram realizadas quatro medidas de oscilação vertical e mais quatro de oscilação horizontal, em que os gráficos obtidos podem ser observados nas figuras 5.5 e 5.6 respectivamente.

Tabela 5.1: Fatores de amortecimento calculados das medidas com altura de resfriamento de 5mm

Medidas à 5mm de gap

Amortecimento Vertical

Medida	Cálculo para 1 <sup>o</sup> . e 2 <sup>o</sup> . Máximos	Cálculo para 2 <sup>o</sup> . e 3 <sup>o</sup> . Máximos
1 <sup>a</sup> .	0,1304	0,1273
2 <sup>a</sup> .	0,1289	0,128
3 <sup>a</sup> .	0,136	0,1364

Amortecimento Horizontal

Medida	Cálculo para 1 <sup>o</sup> . e 2 <sup>o</sup> . Máximos	Cálculo para 2 <sup>o</sup> . e 3 <sup>o</sup> . Máximos
1 <sup>a</sup> .	0,1486	0,1499
2 <sup>a</sup> .	0,1475	0,1456
3 <sup>a</sup> .	0,1516	0,149

Medidas de oscilação vertical para field cooling à 7mm

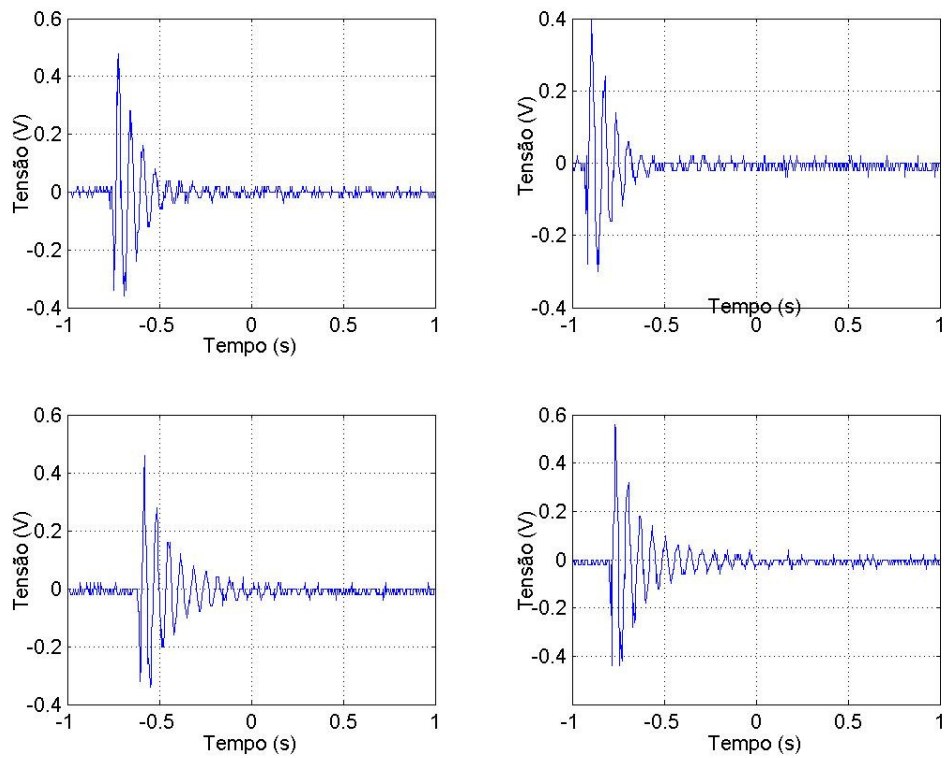


Figura 5.5: Gráficos de medição de oscilação vertical com altura de resfriamento de 7mm

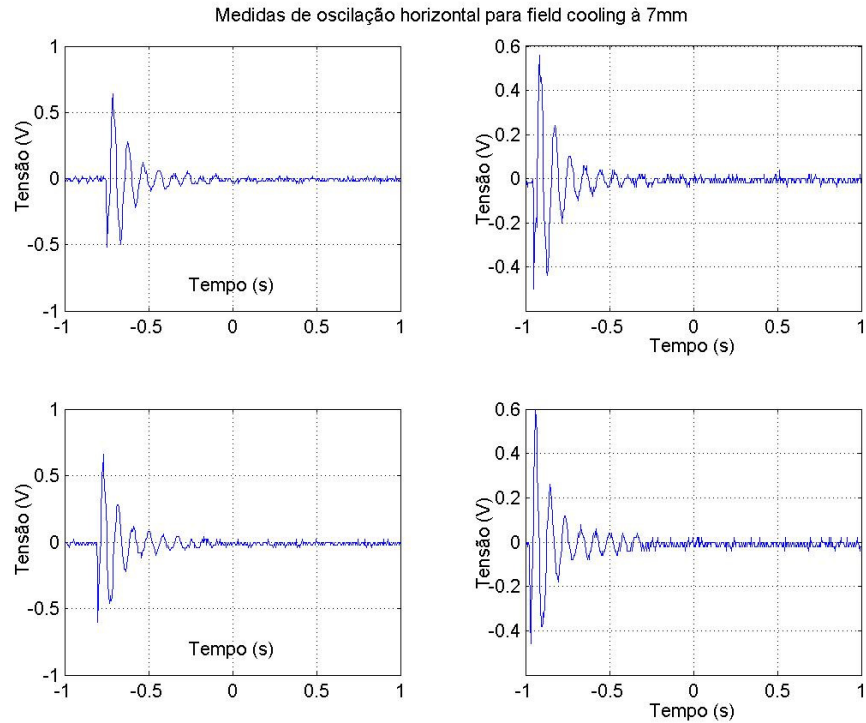


Figura 5.6: Gráficos de medição de oscilação horizontal com altura de resfriamento de 7mm

A tabela 5.2 apresenta os fatores de amortecimento calculados para as medições realizadas com 7mm de altura de resfriamento. A média do fator de amortecimento vertical foi de 0,086 e a horizontal foi de 0,1323.

Tabela 5.2: Fatores de amortecimento calculados das medidas com altura de resfriamento de 7mm  
Medidas à 7mm de gap

Amortecimento Vertical		
Medida	Cálculo para 1o. e 2o. Máximos	Cálculo para 2o. e 3o. Máximos
1a.	0,0855	0,0887
2a.	0,081	0,0855
3a.	0,0788	0,0887
4a.	0,0887	0,0912

Amortecimento Horizontal		
Medida	Cálculo para 1o. e 2o. Máximos	Cálculo para 2o. e 3o. Máximos
1a.	0,1304	0,1336
2a.	0,1336	0,138
3a.	0,1352	0,1336
4a.	0,1319	0,1221

A última altura de resfriamento escolhida foi de 9mm. Após a retirada das peças de sustentação, o protótipo levitava a 7,5mm de altura. Para esse caso também foram realizadas quatro medições de oscilação vertical e quatro de oscilação horizontal. Os respectivos gráficos estão ilustrados nas figuras 5.7 e 5.8. A tabela 5.3 contém os fatores de amortecimento calculados em cada medida. A média do coeficiente de amortecimento vertical foi de 0,0539 e a média do coeficiente de amortecimento horizontal foi de 0,1195.

Analisando os resultados, conclui-se que o coeficiente de amortecimento diminui conforme aumenta a altura de resfriamento. Contudo, deve-se notar que o coeficiente de amortecimento vertical, que é aquele referente ao movimento de queda livre (heave), cai de forma mais drástica que o coeficiente de amortecimento horizontal, que é referente ao movimento de deslizamento lateral (sway). Para efeito comparativo a média do coeficiente de amortecimento vertical à 9mm de gap representa 41,8% da média do coeficiente de amortecimento vertical à 5mm de gap, enquanto a média do coeficiente de amortecimento horizontal à 9mm de gap representa 80,4% da média do coeficiente de amortecimento horizontal à 5mm de gap. Esse resultado demonstra a estabilidade lateral garantida pela SML. Já os níveis de coeficiente de amortecimento vertical medidos são garantidos devido à presença de cobre no criostato e a boa qualidade dos supercondutores.

Tabela 5.3: Fatores de amortecimento calculados das medidas com altura de resfriamento de 9mm

Medidas à 9mm de gap

Amortecimento Vertical

Medida	Cálculo para 1o. e 2o. Máximos	Cálculo para 2o. e 3o. Máximos
1a.	0,0529	0,0571
2a.	0,0517	0,0535
3a.	0,0512	0,0544
4a.	0,0542	0,0559

Amortecimento Horizontal

Medida	Cálculo para 1o. e 2o. Máximos	Cálculo para 2o. e 3o. Máximos
1a.	0,1201	0,1151
2a.	0,1253	0,1181
3a.	0,1223	0,1193
4a.	0,1195	0,1166

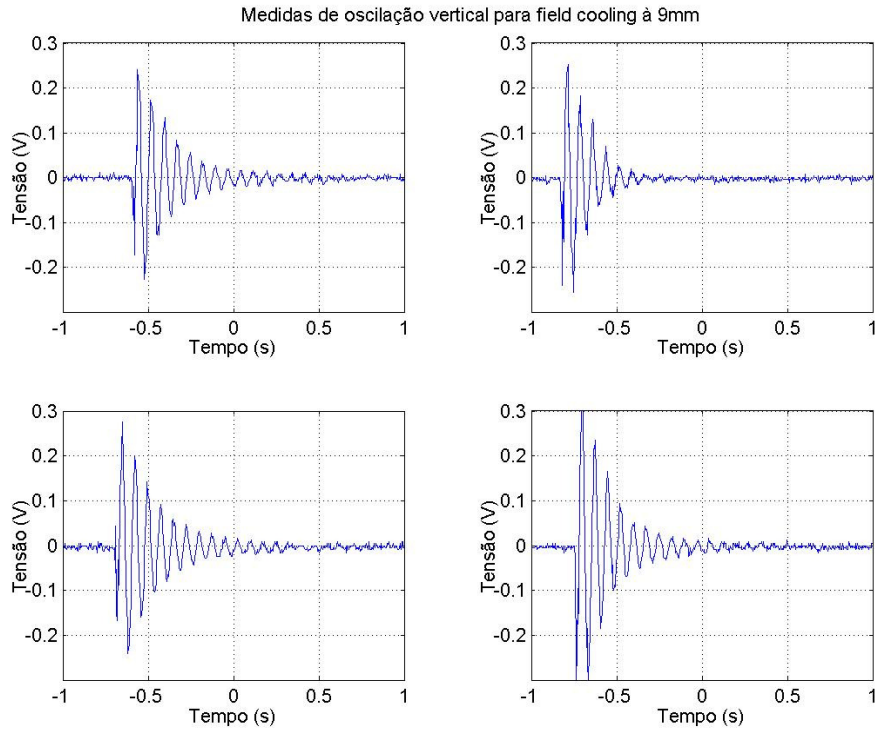


Figura 5.7: Gráficos de medição de oscilação vertical com altura de resfriamento de 9mm

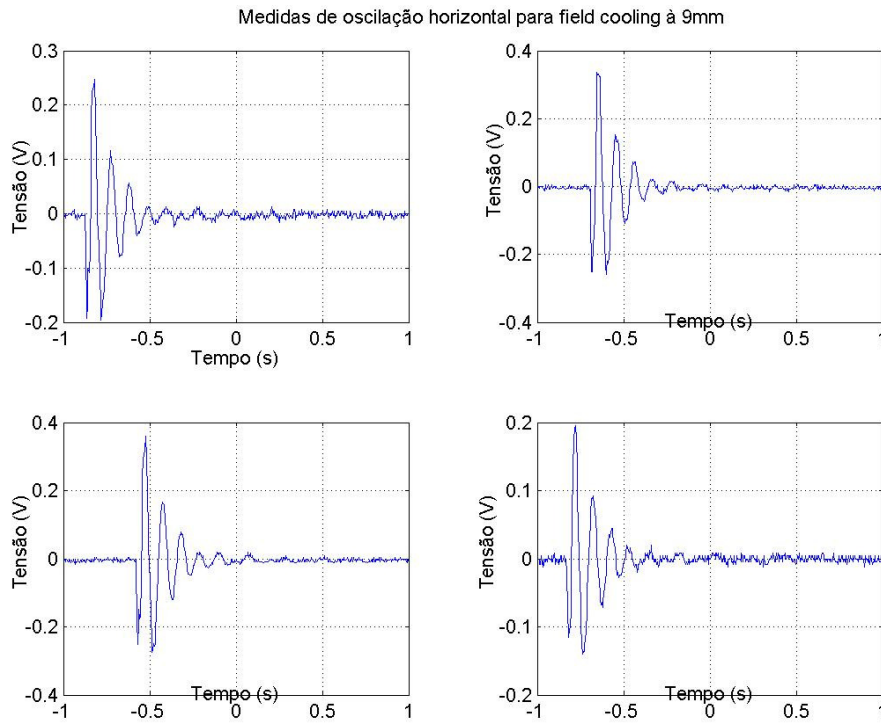


Figura 5.8: Gráficos de medição de oscilação horizontal com altura de resfriamento de 9mm

Um comportamento que foi notado qualitativamente e não quantificado por se tratar de um acoplamento de movimentos, o que dificulta a medição, foi o amortecimento para o movimento de cabeceio (yaw). Para altura de resfriamento de 5mm, foi observado que tal movimento era rapidamente amortecido. Para as alturas de resfriamento de 7mm e 9mm, o mesmo movimento ocorria de forma muito mais intensa, diante do menor amortecimento aparente.

## **6.2 Medições de Força de Levitação**

Em seguida foram realizadas as medições de força, que consistem em dois métodos diferentes. O primeiro método consiste em resfriar os supercondutores em “zero field cooling”, ou seja, na ausência de campo magnético. Para tanto, o criostato foi posicionado a uma altura de 101mm e então verteu-se o nitrogênio líquido até os blocos atingirem o estado supercondutor. Feito isso, o criostato desce até 1mm de altura para então retornar a posição inicial. O gráfico resultante é visto na figura 5.9, onde observamos o comportamento histerético da força. No gráfico uma força positiva representa uma repulsão entre o trilho e o criostato, enquanto uma força negativa representa uma atração. Vale a ressalva que o peso do criostato cheio com nitrogênio líquido foi devidamente retirado. Conforme o criostato se aproxima do trilho, a força de repulsão aumenta até atingir o máximo valor de 200,5 N quando da distância de 1mm, para então diminuir de acordo com o afastamento do criostato. Na mesma figura há também o gráfico ilustrando a pressão calculada, levando em consideração que a área efetiva ocupada pelos supercondutores é de  $0,0055\text{m}^2$ . O valor máximo de pressão é de 36450 Pa.

O segundo método consistiu em resfriar os supercondutores em “field cooling” nas mesmas alturas utilizadas para a medição de oscilação. Atendido o estado supercondutor, o criostato descia até 1mm de altura, para subir até 51mm de altura e então retornar à altura de 1mm.

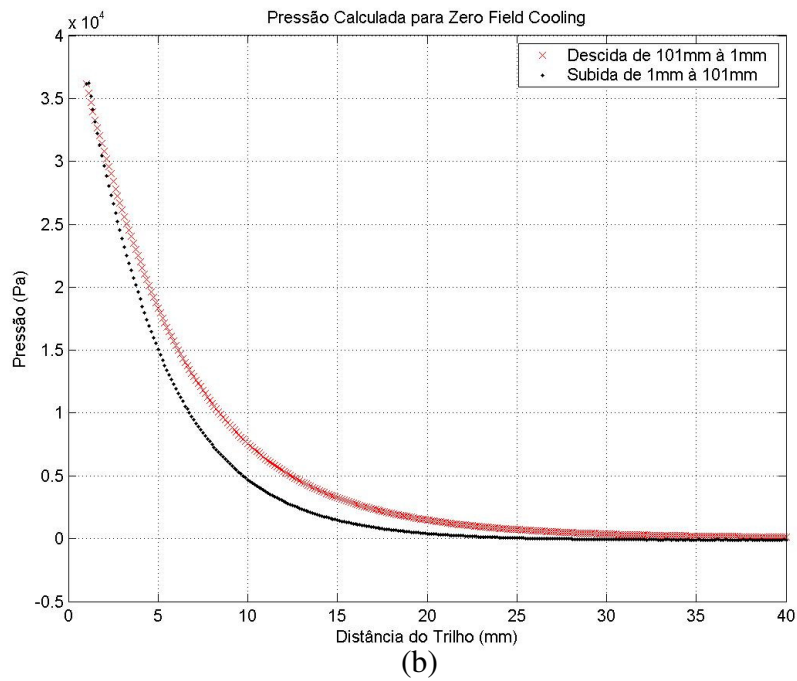
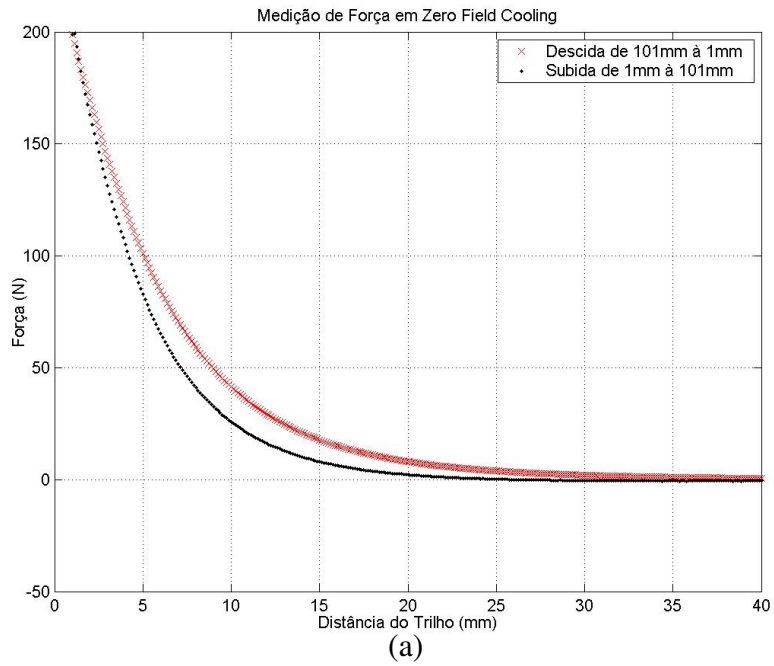


Figura 5.9: (a) Gráfico resultante da medição de força em zero field cooling e (b) o mesmo gráfico com a força convertida para pressão

O gráfico da medição de força para resfriamento a 5mm de altura é observado na figura 5.10. Para esse caso, a máxima força de repulsão alcançada foi de 100,2 N a 1mm de altura, o que representa uma pressão de 18220 Pa. A máxima força de atração foi de 30,8 N a altura de 10,9mm durante a subida. Devido ao comportamento histerético da força, a altura de equilíbrio do criostato se modifica sendo 4,7mm na subida e 6mm na segunda descida. Já o gráfico da medição de força para resfriamento a 7mm de altura é visto na figura 5.11. A máxima força de repulsão alcançada foi de 126,5 N a 1mm de altura, representando uma pressão de 23000 Pa. A máxima força de atração foi de 21,3 N a altura de 12,8mm durante a subida. A altura de equilíbrio do criostato foi de 6,3mm na subida e 7,7mm na segunda descida. Por fim, o gráfico da medição de força para resfriamento a 9mm de altura é visto na figura 5.12. A máxima força de repulsão alcançada foi de 140,1 N a 1mm de altura, o que representa uma pressão de 25470 Pa. A máxima força de atração foi de 15,0 N a altura de 14,7mm durante a subida. A altura de equilíbrio do criostato foi de 7,7mm na subida e 9,3mm na segunda descida.

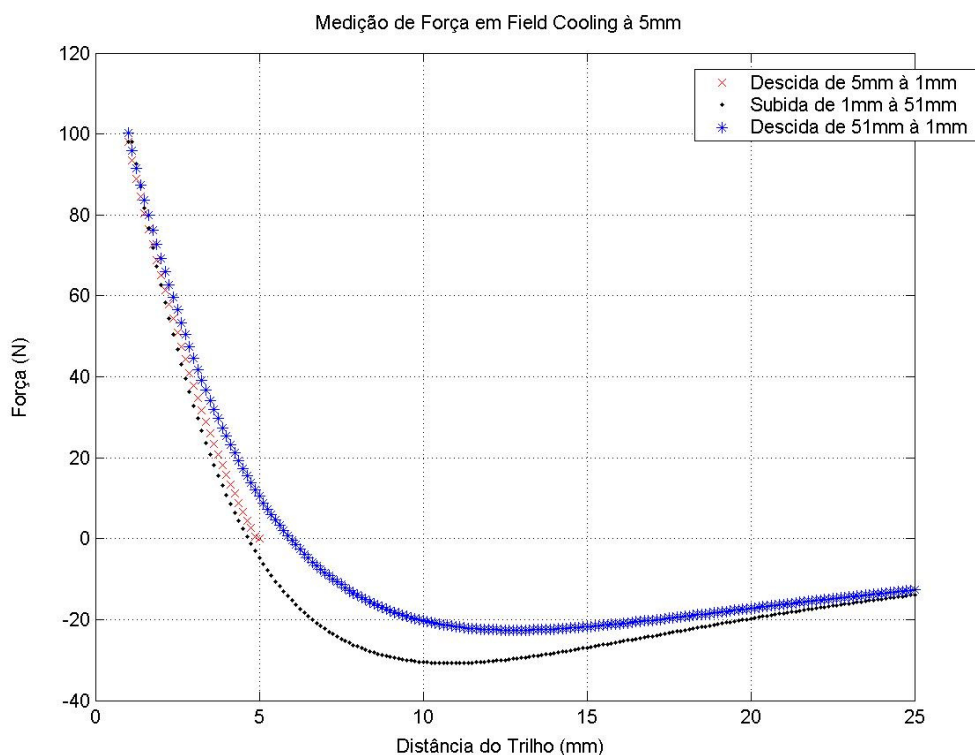


Figura 5.10: Gráfico resultante da medição de força em “field cooling“ a 5mm de altura



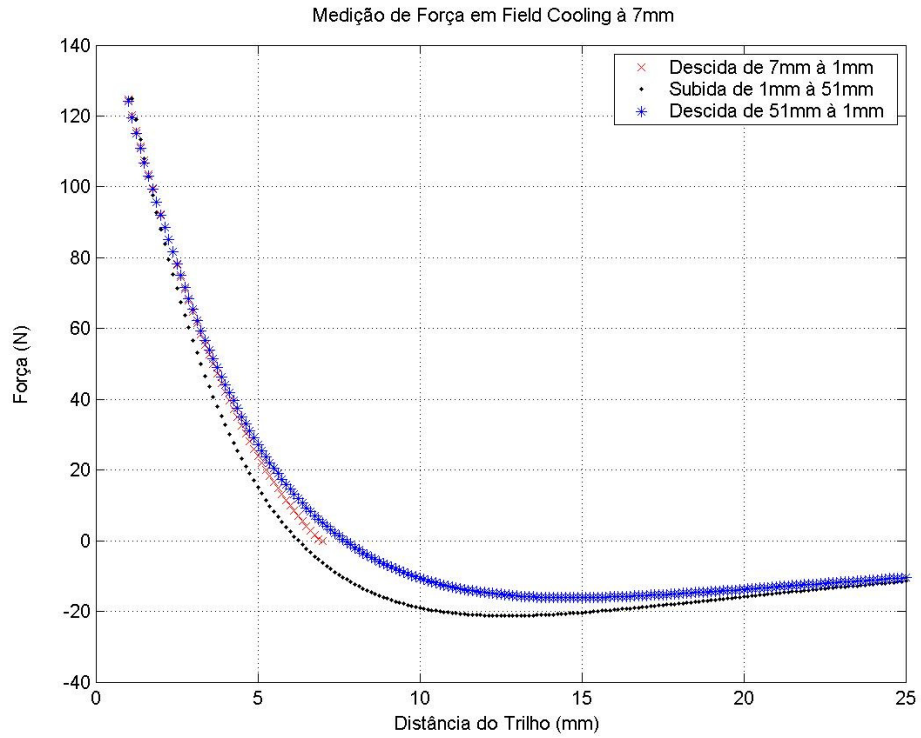


Figura 5.11: Gráfico resultante da medição de força em “field cooling“ a 7mm de altura

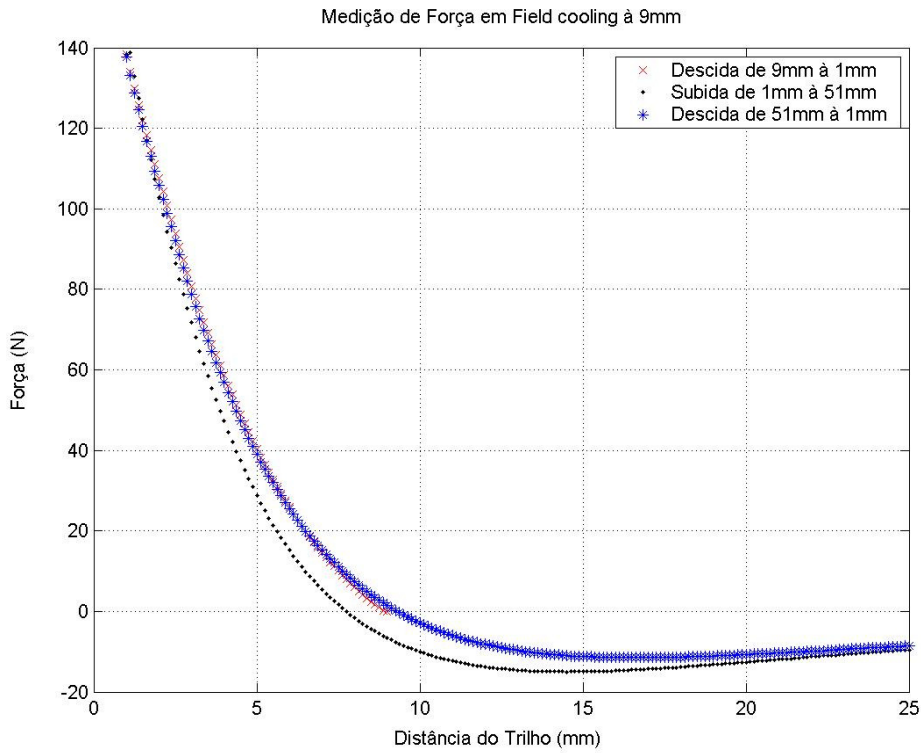


Figura 5.12: Gráfico resultante da medição de força em “field cooling“ a 9mm de altura

Conclui-se que a força de repulsão aumenta quanto maior for a altura de resfriamento. Em contrapartida, a força de atração é maior para uma altura de resfriamento menor. Essa constatação é ainda melhor evidenciada na figura 5.13 com o comparativo dos gráficos. Pode-se observar, também, que quanto maior a altura de resfriamento, a curva de força da primeira descida fica mais próxima da curva da segunda descida. É importante notar que o laço de histerese dos gráficos é considerado pequeno, o que comprova a boa qualidade dos supercondutores encontrados no criostato. Vale ressaltar que as medidas foram realizadas com apenas um dos criostatos (sapatas) componentes do protótipo de trem MagLev, o que na prática representa que o mesmo suporta o dobro das forças relatadas para a altura de levitação de 1mm.

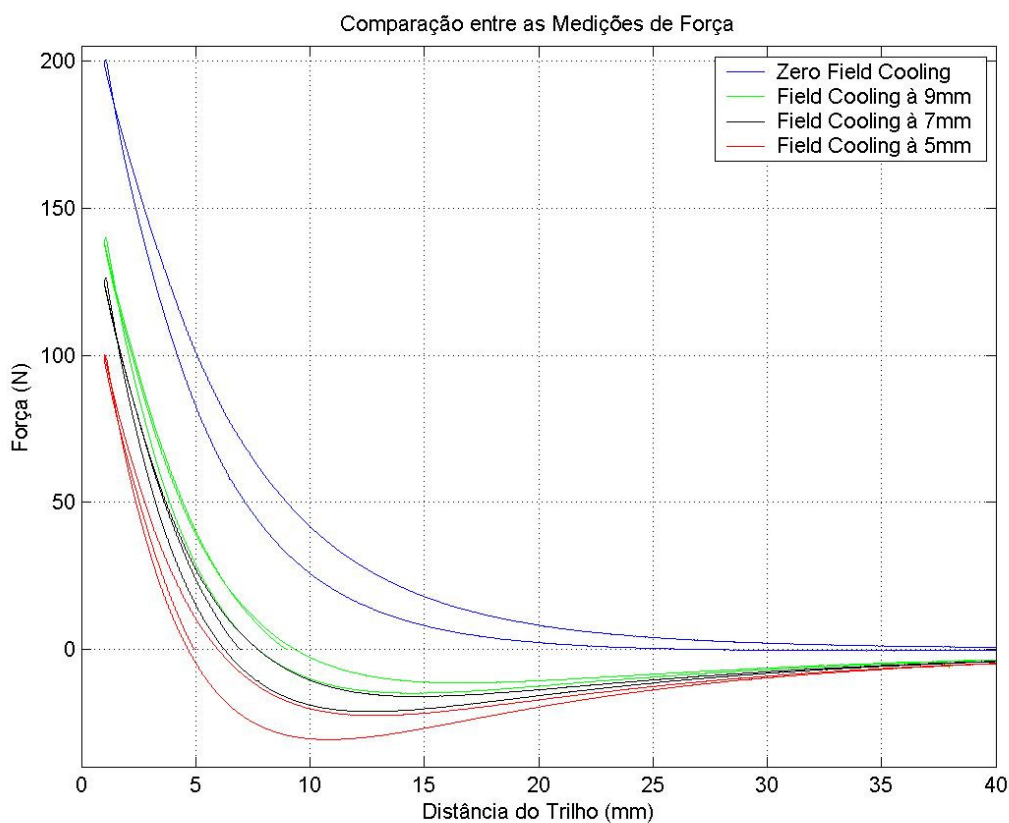


Figura 5.13: Gráfico comparativo entre todas as medições de força

## 6 – Conclusões

O objetivo deste trabalho foi realizar medições de coeficiente de amortecimento e força de levitação no protótipo de trem MagLev e assim esclarecer alguns aspectos do comportamento do mesmo. Tal objetivo foi alcançado com êxito, visto que a partir das medições de oscilação verificaram-se os coeficientes de amortecimento lateral (0,1487, 0,1323 e 0,1195 para as respectivas alturas de resfriamento de 5mm, 7mm e 9mm) e vertical (0,1289, 0,086 e 0,0539 para as respectivas alturas de resfriamento de 5mm, 7mm e 9mm) garantidos pelo método SML. Na medição de força, verificou-se o pequeno laço de histerese formado nos gráficos do comportamento da força. Todas essas constatações indicam a boa qualidade dos supercondutores encontrados dentro dos criostatos componentes do protótipo. A medição de força ainda elucidou o peso que o protótipo pode carregar. Para altura de resfriamento de 5mm o peso suportado é de 20kg, para 7mm é de 25kg e para 9mm é de 28kg. Em todos os casos, o peso é suportado sustentando uma altura de levitação de 1mm

Diante dos resultados, não se pode determinar uma altura de resfriamento ótima, já que o amortecimento e a força de repulsão que compensa a força gravitacional comportam-se inversamente conforme a altura de resfriamento se altera, ou seja, mudando-se a altura enquanto um melhora o outro piora. Dessa forma, o que é necessário ao projeto deve ser analisado. No caso, o protótipo de trem MagLev é utilizado em demonstrações ao público. Portanto, pode-se utilizar o resfriamento a 5mm de altura, que garante um ótimo amortecimento vertical, para fazer o transporte de um animal de pequeno porte, simulando um passageiro. Já a altura de resfriamento de 9mm pode ser utilizada para uma apresentação em que o protótipo simula um trem de carregamento de madeira que não necessita de um melhor amortecimento, podendo assim levar maior carga.

Deve-se lembrar que todas as medidas de oscilação foram realizadas com o trem parado e que o comportamento do mesmo em movimento se modifica. Além disso, as únicas perturbações provocadas foram na direção vertical e horizontal e há muitos outros modos de vibração. Portanto para trabalhos futuros sugere-se o estudo do comportamento dinâmico do trem e dos outros modos de vibração.

## Referências

- [1] Luiz, Adir Moysés - Aplicações da Supercondutividade – Editora Edgard Blücher Ltda. – São Paulo, 1992
- [2] Stephan, Richard M. - Prospective Applications of High Temperature Superconductors in the Electric Energy Sector– Emerging Technology Review (ETR) – CTES Programme, 2004
- [3] Moon, Francis C. - Superconducting Levitation – John Wiley & Sons, Inc – New York, 1994
- [4] da Costa, Giancarlo Cordeiro; Bessa, Márcio Feres; Cavaliere, Carlos A.C.; Almeida, Paulo Roberto L.; Ferreira, Antônio Carlos; Nicolsky, Roberto; Stephan, Richard M. – Protótipo de um Veículo Utilizando Levitação Magnética Supercondutora - XV congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – São Paulo, 1999
- [5] Stephan, R. M.; Ferreira, A. C.; de Andrade Jr., R.; Rolim, L. G. B.; Neves, M. A.; Cruz Moreira, M. A.; Rosário, M. A. P.; Machado, O. J.; Nicolsky, R. – Um Protótipo Brasileiro de Trem de Levitação Magnética - Revista da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência SOBRAEP – Vol. 8, N° 1, Junho de 2003
- [6] Beer, Ferdinand P.; Johnston Jr., E. Russel – Mecânica Vetorial para Engenheiros - Editora McGraw-Hill – São Paulo, 1980
- [7] Segurança e Saúde no Trabalho Portuário – Norma Regulamentadora NR-29, Site do Fórum de Profissionais Latino-Americanos de Segurança - [www.seguranca-la.com.br](http://www.seguranca-la.com.br)
- [8] General Piezoelectric Theory; Suporte técnico do site [www.pcb.com](http://www.pcb.com)
- [9] Introduction to Piezoelectric Accelerometers; Suporte técnico do site [www.pcb.com](http://www.pcb.com)
- [10] de Andrade Jr., R.; Ripper, A.; David, D. F. B.; Nicolsky, R. – Stiffness and damping of an axial superconducting axial bearing - Physica C 341-348 (2000) 2607-2608
- [11] de Andrade Jr., R.; Cardoso, J. A. A. S.; dos Santos, G. C.; de Cicco, L. B.; Fernandes, A. F. G.; do Rosário, M. A. P.; Neves, M. A.; de Souza, A. P.; Ripper, A.; da Costa, G. C.; Nicolsky, R.; Stephan, R. M. - Performance of Nd-Fe-B and Ferrite Magnets in Superconducting Linear Bearings With Bulk YBCO - IEEE Transactions on applied superconductivity, VOL. 13, NO. 2 - Junho de 2003

- [12] Stephan, R.M.; de Andrade Jr., R.; dos Santos, G.C.; Neves, M.A.; Nicolsky, R. - Levitation force and stability of superconducting linear bearings using NdFeB and ferrite magnets - *Physica C* 386 (2003) 490 –494
- [13] Thomson, William T. – Teoria da Vibração - Editora Interciência – 1978
- [14] Basilio, J. C.; Matos, S. R. - Design of PI and PID Controllers With Transient Performance Specification - *IEEE Transactions on Education*, VOL. 45 – pág. 364, NO. 4 – Novembro de 2002
- [15] Sotelo, Guilherme Gonçalves – Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos - Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro
- [16] Wang, J. S.; Wang, S. Y.; Ren, Z. Y.; Zhu, M.; Jiang, H.; Tang, Q. X. – Levitation Force of a YBaCuO Bulk High Temperature Superconductor over a NdFeB Guideway – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, VOL 11 – pág. 1801, NO. 1 – Março de 2001
- [17] Wang, J. S.; Wang, S. Y.; Ren, Z. Y.; Zhu, M.; Jiang, H.; Tang, Q. X.; Wang, X. R. - Levitation Force of Multi-Block YBaCuO Bulk High Temperature Superconductor - *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, VOL 11 – pág. 1808, NO. 1 – Março de 2001
- [18] Hysteretic Magnetic Forces Calculation for Type-II Superconductors – Terry Torng, Quark Chen, Blaise Morton, Jim Lenz – *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL 28, NO. 5 – Setembro de 1992
- [19] Yamachi, N.; Nishikawa, T.; Sawa, K.; Murakami, M. - Measurements of Magnetic Fields and Levitation Forces of Bulk Superconductors – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, VOL 13 – pág. 3651, NO. 2 – Junho de 2003