COMPORTAMENTO DA FORÇA DE LEVITAÇÃO EM MANCAIS LINEARES FRENTE A OSCILAÇÕES DO SUPERCONDUTOR

Daniel Henrique Nogueira Dias

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 DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

_____

Prof. Rubens de Andrade Junior, D.Sc

(Orientador)

_____

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing

_____

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2010

Agradecimentos

Em especial à minha esposa Carolina de Souza Teixeira, que sempre me deu forças e, principalmente, muito incentivo para alcançar meus objetivos,

Aos meus pais, em quem pude sempre contar e por sempre me apoiar em minhas decisões e nos momentos de maiores dificuldades,

Aos amigos e colegas de trabalho do LASUP, pela grande contribuição dada para a realização do trabalho e também, não menos importante, pelos inúmeros momentos de descontração vivenciados dentro e fora das dependências do laboratório,

Ao meu orientador Dr. Rubens de Andrade Junior e ao Prof. Dr. Richard Magdalena Stephan pelo apoio e incentivo dado durante este período.

Resumo

O presente trabalho consiste em investigar o comportamento da força de levitação magnética em mancais lineares supercondutores devido a oscilações do supercondutor em torno do ponto de equilíbrio. Os testes são realizados considerando o resfriamento na presença (*field cooling - FC*) e ausência (zero *field cooling - ZFC*) de campo magnético. Para essas oscilações são consideradas deslocamentos laterais do supercondutor (com o intuito de simular a realização de curvas pelo veículo) e deslocamentos verticais, que tem como objetivo simular a carga e descarga do veículo (entrada e saída de passageiros). Para realização dos ensaios foi utilizado um sistema de medidas de força capaz de realizar movimentos na direção z e y do espaço. Para a parte magnética do mancal linear supercondutor utilizou-se uma seção de um trilho de ímãs permanentes de Nd-Fe-B, arranjados sob a forma de concentrador de fluxo. Foram utilizadas duas amostras supercondutoras de mesmo tamanho, porém com qualidades diferentes. As medidas realizadas mostraram uma queda percentual em torno de 40% na força de levitação para ensaios com deslocamento Lateral e de até 10% nos ensaios com deslocamentos verticais. Assim, este decaimento deve ser levado em consideração para o desenvolvimento de um veículo de levitação supercondutora.

Índice

Índice iv

1. Introdução 1

2. Supercondutividade 4

2.1.1. Um breve histórico 4

2.1.2. Resposta magnética de um supercondutor 6

2.1.3. Supercondutores do tipo I e do tipo II 8

2.1.4. Aplicações da Supercondutividade 10

3. Equipamentos e componentes utilizados para os ensaios 13

3.1. Sistema de medidas de força 13

3.2. Mancal linear supercondutor 17

4. Resultados 20

4.1. Deslocamentos Laterais 20

4.2. Deslocamentos Verticais 23

5. Conclusões 27

6. Referências 29

Índice de Figuras

Figura 1: Veículo de levitação supercondutora, em escala reduzida, desenvolvido pelo LASUP. 2

Figura 2: Ilustração do fenômeno da levitação supercondura 5

Figura 3: Experiência que mostra a diferença entre um (a) condutor ideal e um (b) supercondutor quando faz a transição de fase na presença de campo. O supercondutor apresenta o efeito Meissner enquanto que o condutor ideal não 7

Figura 4: Comportamento magnético de um supercondutor do tipo I (linha tracejada) e de um supercondutor do tipo II (linha sólida). 8

Figura 5: Rede de vórtices ou Fluxóides distribuída homogeneamente em um supercondutor do tipo II no estado misto. 9

Figura 6: Comportamento do fluxo magnético em supercondutores do tipo I e II para uma temperatura (a) T acima de T_c, (b) T abaixo de T_c, $H<H_c$ (tipo I) e $H<H_{c1}$ (tipo II) (Efeito Meissner) e (c) T abaixo de T_c e $H_{c1}<H<H_{c2}$ (tipo II) (estado misto). 10

Figura 7: Protótipo de veículo de levitação supercondutora, em escala real, desenvolvido pelo LASUP. Destaque para o mancal linear supercondutor composto por um criostato (onde são acomodados os supercondutores) e um trilho magnético. 11

Figura 8: Maquete em escala real do veículo MagLev Cobra desenvolvido pelo LASUP. 12

Figura 9: Célula de carga de seis eixos utilizada para o novo sistema de medidas. 13

Figura 10: Diagrama de blocos em *Simulink* para leitura do sensor de força de seis eixos. 14

Figura 11: Desenho esquemático do sistema de medidas de força com 3 graus de liberdade no deslocamento espacial. 15

Figura 12: Linhas de comando do algoritmo escrito em linguagem do Matlab para executar a comunicação do controlador com o computador através de porta serial. 16

Figura 13: Foto do sistema de medidas de força utilizado. 16

Figura 14: (a) Foto do trilho magnético utilizado para as medidas e (b) suas dimensões. Também é mostrada a orientação magnética dos ímãs permanentes. 17

Figura 15: Perfil de campo magnético medido em diferentes alturas do trilho magnético. 18

Figura 16: Blocos supercondutores utilizados para as medidas de força 18

Figura 17: Densidade de fluxo magnético aprisionado devido à presença de um ímã de Nd-Fe-B para as amostras (a) 1 e (b) 2.....19

Figura 18: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado em ZFC para a amostras 1 e 2. 21

Figura 19: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 30 mm para a amostras 1 e 2. 21

Figura 20: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 25 mm para as amostras 1 e 2.....21

Figura 21: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 20 mm para as amostras 1 e 2.....22

Figura 22: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 15 mm para as amostras 1 e 2.....22

Figura 23: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 35 mm para a amostra 2. 24

Figura 24: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 30 mm para a amostra 2 24

Figura 25: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 25 mm para a amostra 2 25

Figura 26: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 20 mm para a amostra 2 25

Índice de Tabelas

Tabela 1: Tabela comparativa entre a força de levitação máxima e final para diferentes tipos de ensaio com deslocamento lateral 23

Tabela 2: Tabela comparativa entre a força de levitação máxima e final para diferentes tipos de ensaio com deslocamento vertical 26

1. Introdução

Desde a descoberta da supercondutividade em materiais metálicos como o mercúrio, que apresentam como característica o transporte de uma corrente elétrica sem dissipação de energia, tem-se estudado a aplicação destes materiais em sistemas elétricos. Porém, somente com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica (HTS), houve um aumento desse interesse por aplicações da supercondutividade no desenvolvimento de dispositivos elétricos supercondutores. A explicação das propriedades magnéticas e os motivos que tornam os HTS tão promissores para aplicações na indústria serão apresentados no capítulo 2.

As aplicações dos supercondutores podem ser agrupadas em dois tipos: pequena escala, com aplicações em biomedicina, metrologia e geofísica, e grande escala, onde se encontram os magnetos supercondutores por exemplo. Dentre as diversas aplicações da supercondutividade, podem-se citar aquelas relacionadas à levitação magnética, cujo componente principal é o mancal magnético.

Os mancais magnéticos podem ser divididos em duas diferentes classes: rotativo e linear. Os mancais rotativos são elementos que permitem somente um grau de liberdade em equipamentos que operam com movimentos de rotação. O aumento da velocidade angular do rotor desse mecanismo pode diminuir o rendimento do mancal devido às perdas de energia mecânica do rotor. Dentre as muitas razões existentes para que essas perdas ocorram, podem-se destacar duas principais: a força de atrito nos pontos de contato entre o suporte e o rotor e o atrito viscoso com o ar. Na maioria dos equipamentos é fundamental o uso de algum mancal rotativo que forneça estabilidade ao rotor e que tenha o mínimo de perda energética.

Já os mancais magnéticos lineares são utilizados para construção de veículos de levitação magnética (MAGLEV). O mancal linear magnético é utilizado em substituição das rodas dos veículos sobre trilhos convencionais. Uma vez que o uso de rodas implica em perdas por atrito de escorregamento com o trilho, a substituição deste sistema por um de levitação, ou seja, sem rodas, permite alcançar velocidades muito mais elevadas e com mais eficiência. Dentre os tipos de levitação magnética podem-se destacar os de levitação eletromagnética, eletrodinâmica e supercondutora. Em comparação com os outros dois tipos de levitação magnética, um sistema de levitação magnética supercondutora demanda menos energia para manter-se levitando. Por outro lado, um dos principais fatores que colaboram para a elevação do custo final de um sistema deste tipo é o trilho magnético. Portanto, devido a estes fatores, a utilização deste tipo de veículo para transportes urbanos de curtas distâncias e baixas velocidades torna-se mais vantajosa do que sua utilização para grandes distâncias em altas velocidades. Para esta última aplicação, os sistemas de levitação eletromagnética e

eletrodinâmica são os mais adequados.

A equipe do Laboratório de Aplicação de Supercondutores (LASUP) da UFRJ vem, ao longo dos anos, trabalhando no desenvolvimento de um veículo de levitação supercondutora. Em uma primeira etapa foi construído um modelo em escala reduzida, cujo deslocamento está condicionado a um circuito fechado. A movimentação do protótipo é realizada por meio de um motor elétrico linear situado entre os dois seguimentos de trilho magnético. Este protótipo pode ser melhor visualizado através da Figura 1 . O acionamento do motor linear foi tema de dissertação de mestrado e pode ser encontrado em [1].

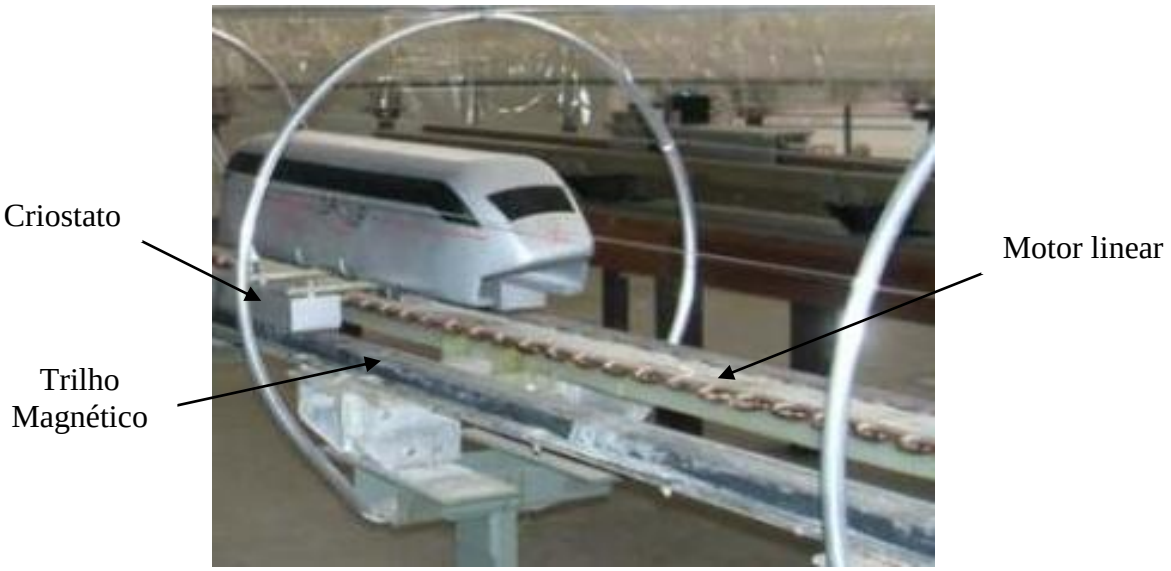

Figura 1: Veículo de levitação supercondutora, em escala reduzida, desenvolvido pelo LASUP.

Após vários testes realizados com o protótipo inicial, a próxima etapa seria a construção de um modelo em escala real do veículo. Este modelo deveria ser capaz de carregar um determinado número de pessoas (carga máxima) a certa altura do trilho magnético (ponto de operação). Para isso os mancais lineares deveriam ter o custo de implantação reduzido, porém, seguindo as restrições da carga máxima a ser transportada. Este estudo foi realizado utilizando ferramentas de simulações capazes de modelar os materiais supercondutores e realizar o cálculo das forças de interação existente entre os mesmos e o campo magnético. O desenvolvimento dessas ferramentas pode ser encontrado em detalhes nas seguintes referências [2-5]. Outro aspecto que deve ser levado em consideração são as oscilações do supercondutor em torno do ponto de equilíbrio. Estas oscilações podem ser produzidas pela entrada e saída de pessoas do veículo, variando assim a carga transportada (oscilações verticais) e pela realização de curvas, onde o supercondutor é deslocado lateralmente em relação ao trilho. Estudos teóricos [6,7] vêm mostrando que quando o supercondutor

é deslocado lateralmente, a força de levitação tende a diminuir. Isso faz com que o ponto de operação do sistema seja modificado, podendo gerar problemas para a operação do mesmo. Este comportamento deve ser considerado no projeto do veículo MagLev. Dessa forma, o foco deste trabalho consiste no estudo do comportamento da força de levitação supercondutora frente a oscilações do supercondutor em torno do ponto de equilíbrio.

Assim, este trabalho está divida da seguinte maneira: o presente capítulo é dedicado à introdução ao trabalho proposto e a apresentação do mesmo. No segundo capítulo serão apresentadas as principais propriedades dos materiais supercondutores, que determinam suas diferentes classes, e o estado da arte do veículo MagLev supercondutor desenvolvido neste laboratório. O mancal linear e as amostras supercondutoras utilizadas nos ensaios, bem como o aparato experimental utilizado, estão descritos no terceiro capítulo. Os resultados obtidos pelos ensaios realizados para diferentes tipos de amostras supercondutoras serão apresentados no capítulo quarto. Os resultados estão divididos em medidas de força de levitação em *Zero Field Cooling* (ZFC) e *Field Cooling* (FC) em ensaios realizados com deslocamentos laterais e verticais. Finalmente, no quinto e último capítulo, serão discutidas as conclusões deste trabalho bem como sugestões de trabalhos a serem realizados futuramente.

2. Supercondutividade

Para que aplicações utilizando materiais supercondutores sejam possíveis, faz-se necessário um estudo das principais propriedades destes materiais. Neste capítulo serão apresentadas as principais propriedades dos materiais supercondutores bem como efeitos associados ao fenômeno da supercondutividade. Primeiramente será apresentado um breve resumo histórico dos fatos experimentais e teóricos mais relevantes sobre o desenvolvimento da supercondutividade. No decorrer do capítulo, as propriedades eletromagnéticas destes materiais que determinam suas diferentes classes e nichos de aplicação serão introduzidas.

2.1.1. **Um breve histórico**

O fenômeno da supercondutividade foi descoberto em 1911 pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes [8] ao perceber que a resistividade do mercúrio caía repentinamente a zero quando sua temperatura era inferior a uma temperatura crítica T_c de 4.2K. Em 1913 foi descoberto que o chumbo também se tornava supercondutor quando resfriado a uma temperatura abaixo de 7.2K. Em 1914 Kamerlingh Onnes notou que a supercondutividade podia ser destruída por um campo magnético aplicado, quando ultrapassado um valor crítico H_c. Devido a esse fato, verificou-se também que existe um valor crítico para a densidade de corrente que flui no material, acima do qual este passa da fase supercondutora para a fase normal. Em resumo, a supercondutividade é destruída quando for superado qualquer um dos parâmetros críticos: a temperatura crítica T_c, o campo crítico H_c e a densidade de corrente crítica J_c.

Outra característica dos supercondutores é a capacidade de expelir as linhas de campo magnético de dentro do material. Esse efeito é chamado de efeito Meissner, descoberto em 1933 por W. Meissner e R. Ochsenfeld [9]. Assim, os supercondutores, além de serem condutores perfeitos, são também, diamagnetos perfeitos (efeito Meissner). Com relação a esse efeito, sabemos que existem dois tipos de supercondutores: Os supercondutores do tipo I, onde existe apenas o efeito Meissner, e os supercondutores do tipo II, onde existe uma região em que todo fluxo é expulso de seu interior (efeito Meissner) e uma região em que as linhas de fluxo penetram parcialmente no material (estado misto). Devido a esta propriedade, esses materiais são capazes de levitar acima de fontes de campo magnético como se estivessem flutuando em um “colchão” magnético. A Figura 2 apresenta um exemplo desta aplicação.

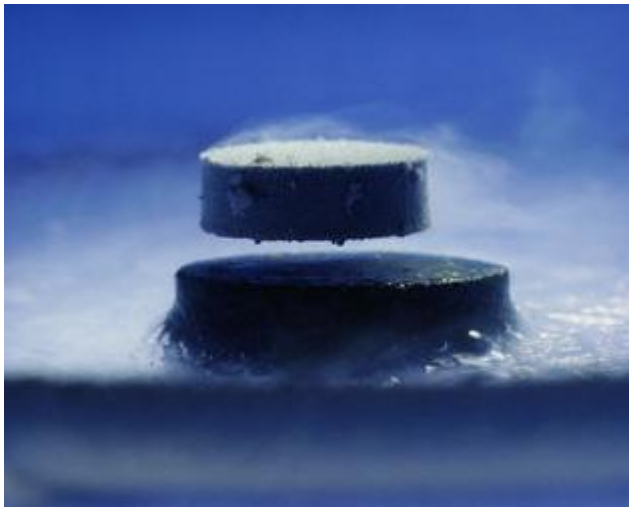

Figura 2: Ilustração do fenômeno da levitação supercondura

A partir dessa descoberta muitas teorias surgiram para tentar explicar as propriedades básicas desses materiais relacionadas com a supercondutividade. Em 1935 F. e H. London [10] desenvolveram uma teoria para explicar estas duas propriedades, mas só em 1950 houve uma primeira sugestão visando o entendimento teórico do fenômeno da supercondutividade. Foi proposta, por V.L. Ginzburg e L.D. Landau, uma teoria fenomenológica para explicar as propriedades termodinâmicas da transição do estado normal para o supercondutor [11]. Embora originalmente fenomenológica, a teoria provou ser muito poderosa. Até os dias de hoje, a descrição de óxidos supercondutores de altas temperaturas críticas é possível com o uso deste formalismo.

Tanto a teoria de London quanto a de Ginzburg-Landau, serviram para estabelecer relações entre diferentes fenômenos. No entanto, ambas são descrições matemáticas dos efeitos observados em laboratório, isto é, teorias fenomenológicas, incapazes de explicar o fenômeno da supercondutividade como conseqüência das leis fundamentais da Física. Este fenômeno começou realmente a ser entendido em 1956, quando Leon Cooper [12] teve a idéia de que os elétrons que transportam a corrente se associam em pares enquanto se deslocam pelo material. Esses pares são conhecidos como pares de Cooper, e são eles os responsáveis pela corrente supercondutora em materiais a baixas temperaturas. Cooper sugeriu que a atração entre os elétrons, necessária para a formação desses pares, poderia ser mediada por fónons, excitações da rede cristalina do material.

Em 1957, John Bardeen, Leon Cooper e Robert Scrieffer [13] apresentaram uma teoria microscópica onde os pares de elétrons ligados transportam a supercorrente e que existe um "gap"de energia separando os elétrons emparelhados dos elétrons normais. Esse gap aparece abaixo da temperatura crítica supercondutora T_c e é uma característica intrínseca dos supercondutores,

conforme demonstrado por vários experimentos como o de tunelamento [14], por exemplo. Essa teoria ficou conhecida por teoria BCS e teve enorme sucesso, explicando muito bem o comportamento da maioria dos materiais supercondutores conhecidos até a década de 80 do século passado (supercondutores convencionais).

Em 1962, Charles P. Bean [15] propôs uma modelagem fenomenológica para o supercondutor, que ficou conhecida como modelo de estado crítico. Essa modelagem considera que uma densidade de corrente elétrica J_c deve fluir em uma determinada região do supercondutor que dependerá do campo aplicado. A distribuição de J_c no supercondutor deve variar da fronteira externa para o interior do HTS conforme a variação do campo aplicado no material. Essa modelagem que será estudada com detalhes em capítulos futuros pode ser aplicada em cálculos de campos.

Mas, em 1986, J.G. Bednorz e K.A. Müller [16] descobriram novos compostos supercondutores a base de óxidos de lantânio e bário, com temperaturas críticas mais elevadas. Começa então, a partir desse momento, a fase dos supercondutores de altas temperaturas críticas (HTSC). A descoberta de compostos com temperatura crítica acima da temperatura de liquefação do nitrogênio permitiu um avanço muito grande nas aplicações dos materiais supercondutores. O custo energético do nitrogênio líquido, cuja temperatura de ebulição é de aproximadamente 77K, é muito menor do que o hélio líquido, antes utilizado para resfriar os supercondutores de baixa temperatura crítica.

Os supercondutores cerâmicos de alta temperatura crítica revolucionaram as pesquisas na área e diversas aplicações propostas utilizando materiais supercondutores podem ser encontradas em [17]. Maiores informações sobre as características físicas de alguns supercondutores de alta temperatura crítica para o desenvolvimento de dispositivos elétricos, podem ser encontradas no trabalho de Larbalestier [18].

2.1.2. **Resposta magnética de um supercondutor**

Como visto anteriormente, o estado supercondutor de um material é caracterizado por apresentar características tanto de um diamagneto ideal quanto de um condutor ideal. Ambas características resultam na expulsão total do fluxo magnético no interior de um supercondutor maciço. Esta propriedade foi observada pela primeira vez por Meissner e Ochsenfeld em 1933 e ficou conhecida como efeito Meissner. Contudo, o comportamento magnético de um condutor ideal é muito diferente de um supercondutor.

A diferença entre um condutor ideal e um supercondutor pode ser entendida mais facilmente

através da Figura 3. Na parte (a) mostra-se uma esfera maciça condutora submetida a um campo magnético externo H. Este campo penetra totalmente na esfera conforme previsto pela Eletrodinâmica clássica. Para um condutor ideal o fluxo é excluído devido a correntes induzidas no material devido a variação do mesmo. Quando $T<T_c$, a esfera condutora se torna um condutor ideal, isto é, possui resistência nula. Como não ocorre nenhuma variação de fluxo magnético também não surge nenhuma corrente induzida e o fluxo permanece inalterado. Quando o campo magnético externo é eliminado (H=0), uma corrente é induzida e cria um fluxo magnético interno igual ao fluxo magnético externo original. Já na parte (b) da Figura 3 mostra-se uma esfera feita com material supercondutor. No início, a esfera supercondutora é submetida a um campo magnético externo em uma temperatura $T>T_c$. Neste caso a esfera encontra-se numa fase condutora normal, e o fluxo magnético penetra em seu interior. Quando T possui um valor menor que T_c, a esfera sofre uma transição de fase e passa para a fase supercondutora, expulsando o fluxo magnético do seu interior (efeito Meissner), o que não ocorre para um condutor ideal. Quando o campo externo H vai a zero, a esfera não aprisiona nenhum fluxo magnético em seu interior, como ocorre no condutor ideal.

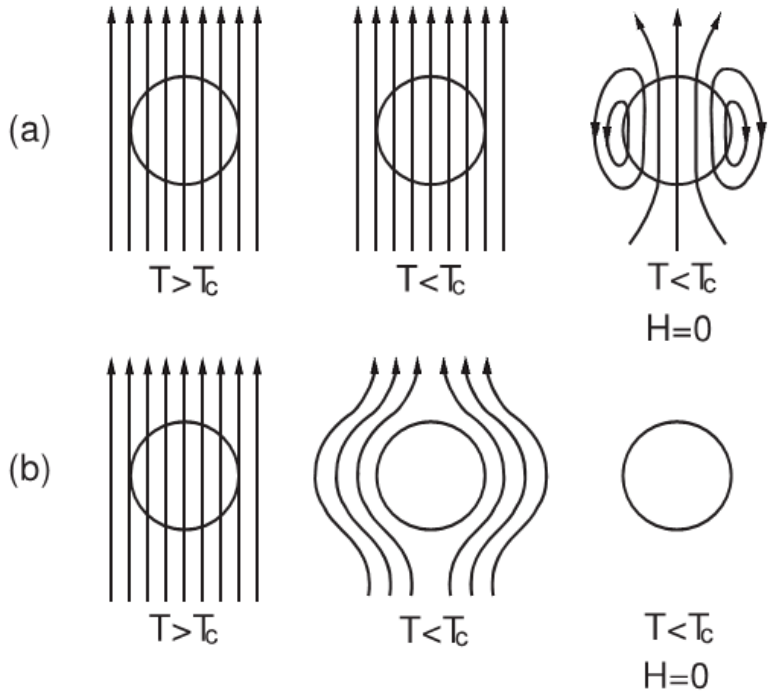

Figura 3: Experiência que mostra a diferença entre um (a) condutor ideal e um (b) supercondutor quando faz a transição de fase na presença de campo. O supercondutor apresenta o efeito Meissner enquanto que o condutor ideal não

Apesar da diferença existente entre um supercondutor e um condutor ideal, a propriedade de

resistência nula de um supercondutor é fundamental para a existência do efeito Meissner. A corrente que circula na superfície de um supercondutor é responsável pela criação de uma magnetização volumétrica que possui sentido contrário ao sentido do campo magnético externo H. Por esta razão, o valor de B se anula sempre no interior de um supercondutor. Se a resistência elétrica não fosse nula, a corrente superficial (que produz a magnetização necessária para anular o valor de H) deveria diminuir com o tempo e, portanto, o valor de B deixaria de ser nulo no interior do supercondutor.

2.1.3. **Supercondutores do tipo I e do tipo II**

Com relação à propriedade de exclusão total do fluxo magnético interno, os materiais supercondutores podem ser classificados como supercondutores do tipo I, também conhecidos como supercondutores moles ("soft") e supercondutores do tipo II, também conhecidos como supercondutores duros ("hard"). Para um supercondutor do tipo I só existe um valor para o campo magnético crítico H_c, acima do qual o supercondutor passa para a fase normal. No entanto, para um supercondutor do tipo II existem dois valores para o campo magnético crítico: o campo crítico superior H_{c2} e o campo crítico inferior H_{c1}. A Figura 4 mostra a magnetização M em função do campo magnético H. Pode-se observar que, ao contrário dos supercondutores do tipo I, que a magnetização vai a zero quando o campo ultrapassa um valor crítico H_c, para um supercondutor do tipo II até um valor de $H = H_{c1} < H_c$ o fluxo magnético é completamente excluído de seu interior (estado Meissner). Entretanto, na região entre H_{c1} e H_{c2}, o fluxo magnético não é completamente expulso e penetra parcialmente no interior do material. Quando $H > H_{c2}$, o material deixa de ser supercondutor e a magnetização vai a zero.

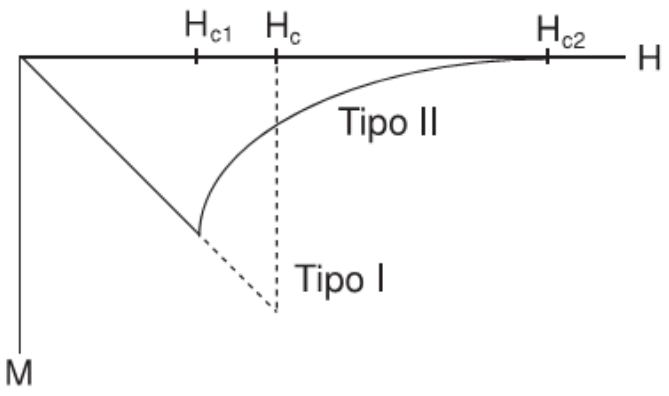

Figura 4: Comportamento magnético de um supercondutor do tipo I (linha tracejada) e de um supercondutor do tipo II (linha sólida).

Em um supercondutor do tipo II a região entre H_{c1} e H_{c2} é conhecida como estado misto. O estado misto é caracterizado pela coexistência de regiões normais e supercondutoras no material.

Essas regiões normais existem em forma de tubos, distribuídas homogeneamente pelo material e são circuladas por vórtices de supercorrentes que as mantém isoladas das regiões supercondutoras. Por essa razão esses tubos de região normal são conhecidos como vórtices. Os vórtices, também chamados de fluxóides, devido ao fluxo quantizado, se distribuem no supercondutor em uma rede regular triangular. Essa estrutura foi prevista pela primeira vez pelo cientista russo Alexei A. Abrikosov [19]. Esta distribuição regular dos vórtices recebeu o nome de rede de Abrikosov. A Figura 5 mostra uma representação esquemática de uma rede de vórtices presente em um supercondutor do tipo II.

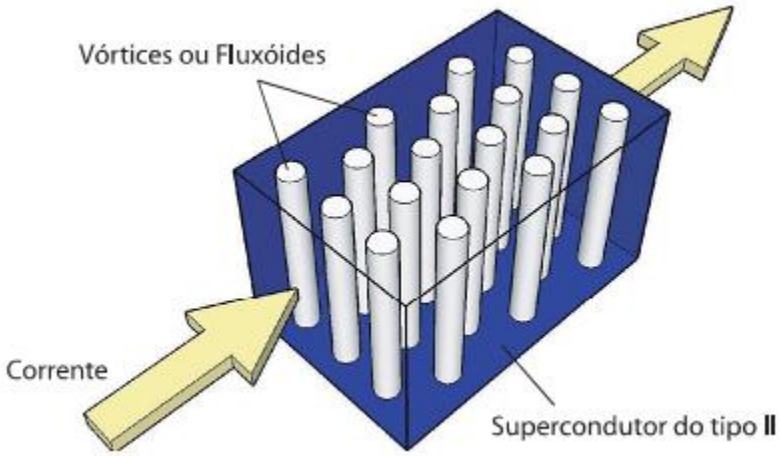

Figura 5: Rede de vórtices ou Fluxóides distribuída homogeneamente em um supercondutor do tipo II no estado misto.

Para uma melhor visualização prática da diferença existente entre a resposta magnética de um supercondutor do tipo I e outro do tipo II, um desenho esquemático do comportamento das linhas de fluxo magnético sob diferentes condições é apresentado. Na parte (a) da Figura 6 é mostrada a resposta magnética para um supercondutor tanto do tipo I quanto do tipo II para temperaturas acima de T_c. Já na parte (b) mostra-se o comportamento do fluxo magnético para um supercondutor do tipo I em campos abaixo de H_c e para o tipo II em campos abaixo de H_{c1} (Efeito Meissner). Finalmente, na parte (c), é apresentado o comportamento do fluxo em um supercondutor do tipo II em campos compreendidos entre H_{c1} e H_{c2} (estado misto). Percebe-se, neste último, que o aprisionamento do fluxo se dá através dos fluxóides, representados por cilindros que envolvem parte do fluxo dentro do material.

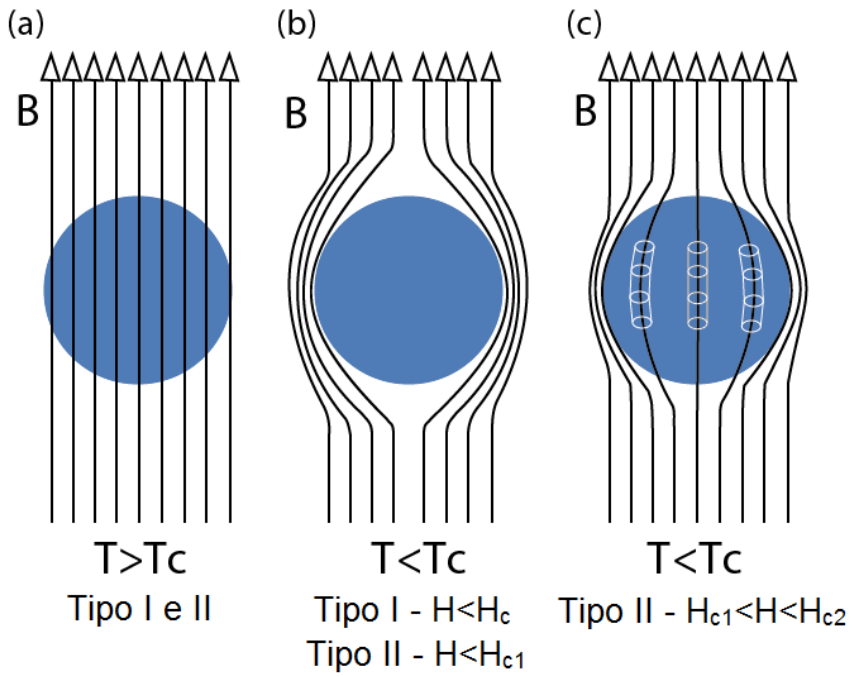

Figura 6: Comportamento do fluxo magnético em supercondutores do tipo I e II para uma temperatura (a) T acima de T_c, (b) T abaixo de T_c, $H<H_c$ (tipo I) e $H<H_{c1}$ (tipo II) (Efeito Meissner) e (c) T abaixo de T_c e $H_{c1}<H<H_{c2}$ (tipo II) (estado misto).

2.1.4. **Aplicações da Supercondutividade**

Algumas aplicações da supercondutividade já são usadas na prática em laboratórios, aceleradores de partículas e hospitais. Contudo, outras aplicações da supercondutividade se tornarão economicamente viáveis futuramente. Dentre essas diversas aplicações pode-se destacar a levitação magnética supercondutora. Nesta subseção será apresentada uma breve descrição deste tipo de aplicação e a comparação com outros tipos de levitação. Será apresentado também o estado da arte do veículo de levitação supercondutora (MagLev Cobra) que está sendo desenvolvido no LASUP.

Levitação Supercondutora e o veículo MagLev Cobra

Como visto anteriormente, a levitação supercondutora se dá pela exclusão parcial do campo magnético no interior do supercondutor. A parte do campo que é aprisionada pelo material supercondutor é responsável pela alta estabilidade desse sistema de levitação. Este tipo de levitação só pôde ser devidamente explorado a partir do final do século XX com a sintetização dos supercondutores de alta temperatura crítica, cuja temperatura de transição é acima da temperatura de liquefação do nitrogênio. Uma das vantagens da levitação supercondutora em relação à levitação eletromagnética é a sua estabilidade passiva. Devido a esta característica, a utilização de um

mecanismo de controle, como o utilizado na levitação eletromagnética, não se faz necessário. Com relação ao sistema eletrodinâmico, apesar de também ser estável, a levitação só ocorre após o trem entrar em movimento. Este fato não permite a ausência total do sistema roda trilho convencional, o que não ocorre com a levitação supercondutora.

A Figura 7 mostra a foto de um módulo com 1m de comprimento em escala real do veículo de levitação supercondutora que está sendo desenvolvido no LASUP. O sistema consiste em um veículo composto por um conjunto desses módulos, em cuja base são colocados criostatos. Dentro de cada criostato encontram-se 24 blocos supercondutores responsáveis pela levitação do veículo devido à interação com o campo gerado pelo trilho magnético. Como não apresenta nenhum ponto de contato com o trilho, o veículo se movimenta sem atrito através de um motor elétrico linear instalado entre os dois segmentos do trilho magnético

Figura 7: Protótipo de veículo de levitação supercondutora, em escala real, desenvolvido pelo LASUP. Destaque para o mancal linear supercondutor composto por um criostato (onde são acomodados os supercondutores) e um trilho magnético.

Um dos principais fatores responsáveis pela elevação do custo final de um sistema de levitação supercondutora é o trilho magnético, composto basicamente por blocos de ímãs de Nd-Fe-B. Devido a este fator, a utilização deste tipo de veículo para longas distâncias torna-se inviável, restringindo sua utilização a distâncias mais curtas, como para o transporte urbano [20]. Contudo faz-

se necessário a otimização da força de levitação em relação ao custo do trilho. Uma maquete em escala real do veículo completo, com quatro módulos, pode ser vista na Figura 8

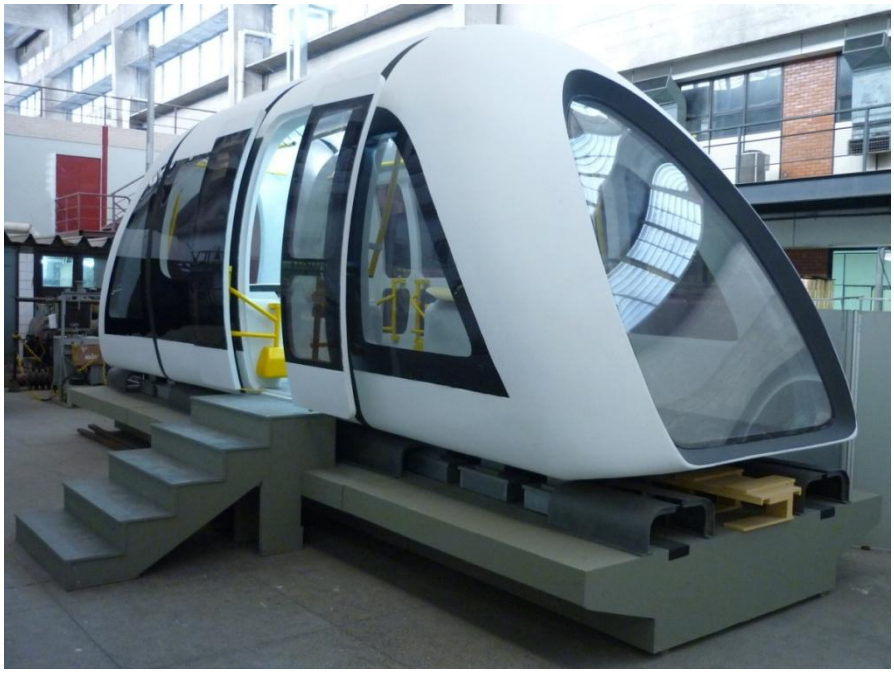

Figura 8: Maquete em escala real do veículo MagLev Cobra desenvolvido pelo LASUP.

3. Equipamentos e componentes utilizados para os ensaios

Este capítulo se destina à apresentação do sistema de medidas utilizado para a realização dos experimentos, bem como a descrição dos componentes constituintes do mancal linear supercondutor utilizado (trilho magnético e amostras supercondutoras). Os resultados e análises das medidas realizadas serão apresentados no capítulo seguinte deste documento.

3.1. Sistema de medidas de força

Como dito anteriormente, o foco deste trabalho é determinar o comportamento da força de levitação supercondutora frente a oscilações do supercondutor em torno do seu ponto de equilíbrio. Dessa forma faz-se necessário a utilização de um sistema de medida de força capaz de realizar deslocamentos verticais e horizontais em relação ao trilho magnético. Para a leitura da força foi utilizado um sensor capaz de medir forças com seis graus de liberdade (3 eixos de força e 3 eixos de torque). Este sensor pode ser visto na Figura 9.

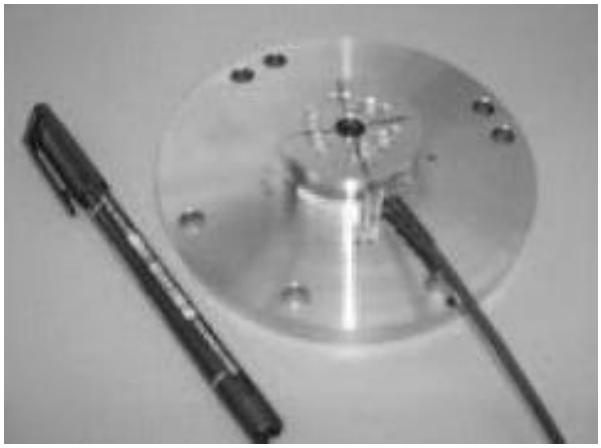

Figura 9: Célula de carga de seis eixos utilizada para o novo sistema de medidas.

O processamento (amplificação e conversão A/D) dos sinais aferidos pelo sensor é feita por uma placa de interfaceamento fornecida pelo fabricante. A leitura dos sinais pós processados, já em níveis de tensão apropriados, foi feita através da placa de aquisição de dados Meilhaus Electronics ME-2600 conectada a um micro-computador. Para a comunicação com a placa foi utilizado o pacote de simulação em tempo real do *Simulink*, o *Real Time Workshop*. Por se tratar de um sensor com seis graus de liberdade, os seis sinais de tensão enviados estão acoplados entre si. É necessário então efetuar o desacoplamento destes sinais e converte-los para unidade de força. Para isso deve-se primeiro concatenar os sinais recebidos em uma matriz e efetuar a multiplicação com uma matriz de desacoplamento, fornecida pelo fabricante, de acordo com o nível de força em que deseja-se

trabalhar. Para o caso em questão, fez-se uso de uma matriz de calibração para força máxima na direção z de 580 N. Para que os valores de força e de torque estivessem com as unidades em N e N.m respectivamente, fez-se a multiplicação do sinal obtido após a operação com a matriz de desacoplamento por um vetor de calibração da célula, também fornecido pelo fabricante. Após todos estes procedimentos as informações de todas as forças e torques lidos pelo sensor estão desacopladas e os valores dos mesmos são atualizados em tempo real no *workspace* (área de trabalho) do *Matlab* para futura utilização. O diagrama de blocos do programa desenvolvido no *Simulink* pode ser visto na Figura 10.

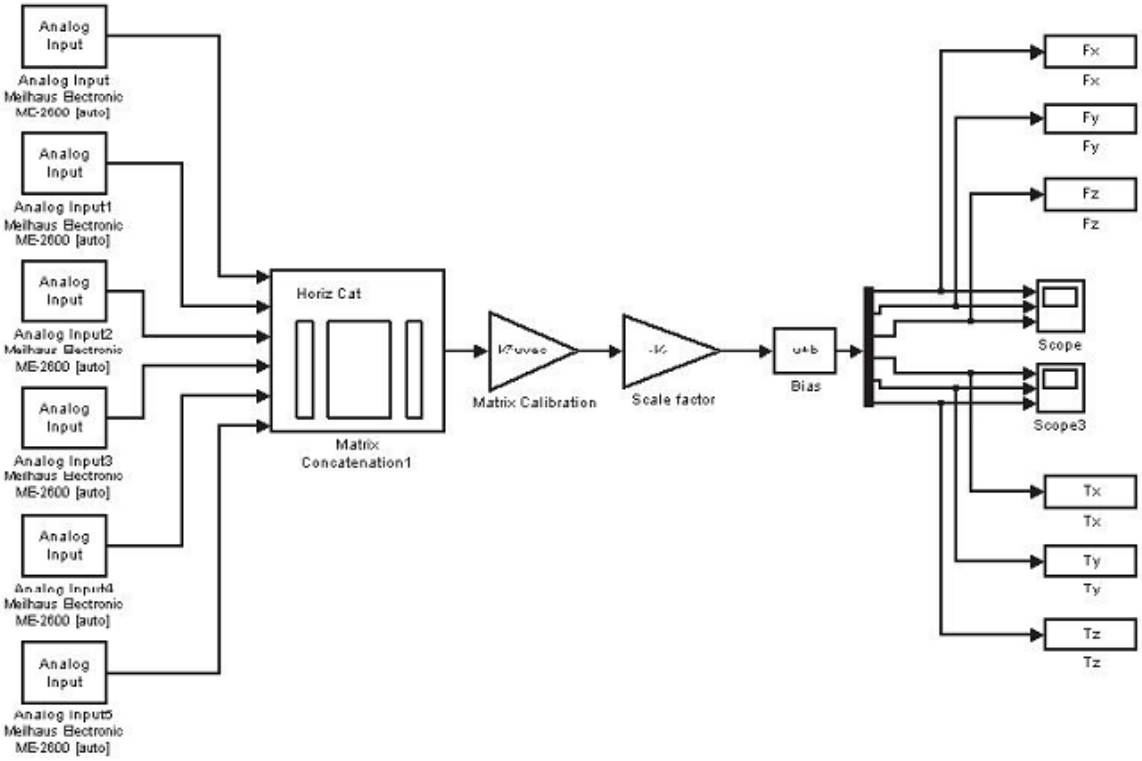

Figura 10: Diagrama de blocos em *Simulink* para leitura do sensor de força de seis eixos.

Uma vez implementada a leitura do sensor de força, faz-se necessário obter o deslocamento do supercondutor no espaço em relação à fonte de campo magnético. Para tentar aproximar ao máximo as medidas realizadas dinamicamente a uma medida estática, a automatização do sistema foi feita da seguinte maneira: primeiramente o supercondutor se desloca da posição inicial para a seguinte e permanece parado por um período de um segundo. Durante este tempo, os valores de força são aferidos pelo sensor e enviados ao *workspace* do *Matlab*. Faz-se então uma média desses valores e esta passa a representar o valor de força relativo à posição em que o supercondutor se encontra. Na sequência, o supercondutor é deslocado para a próxima posição e o procedimento de aferição da força se repete de maneira idêntica à realizada para o passo anterior. Este processo é repetido até que

o movimento do supercondutor tenha completo o ciclo de medidas desejado.

As direções escolhidas para deslocamento do supercondutor foram as direções cartesianas y e z e a direção de rotação em torno do eixo z (ϕ). Como o foco das medidas a serem realizadas foi dado à mancais lineares e considerando a direção de movimento do veículo em x, a força nesta direção é nula. Vale lembrar que, para mancais rotativos, a direção que passa a ter força nula é a direção ϕ, podendo assim, ser substituída por deslocamentos em x. O movimento nas direções y e z é executado por dois atuadores lineares da *ISEL Automation*. O movimento na direção ϕ é realizado por um motor de passo conectado ao atuador linear que executa o movimento em z. O trilho magnético fica fixado no atuador y e o supercondutor é fixado ao sensor de força que por sua vez é acoplado ao motor de movimentação em ϕ. Desta maneira consegue-se o movimento independente do supercondutor em relação ao trilho nas três direções citadas. Uma figura esquemática de como funciona o sistema pode ser visto na Figura 11.

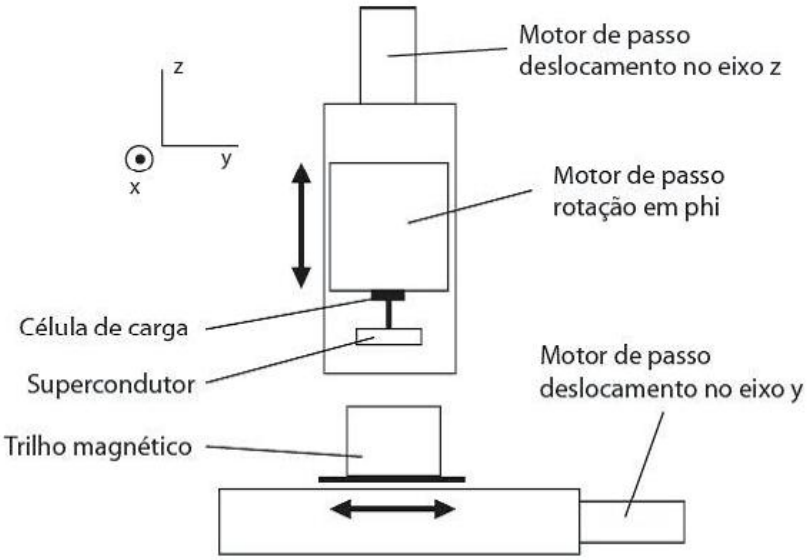

Figura 11: Desenho esquemático do sistema de medidas de força com 3 graus de liberdade no deslocamento espacial.

Para acionamento dos motores de passo que controlam a movimentação do sistema foi utilizado um controlador cuja comunicação com o micro-computador é realizada através de porta serial. Este equipamento, proveniente do mesmo fabricante dos atuadores lineares, permite o controle de até três motores de passo simultaneamente. Para enviar a instrução de movimento ao controlador fez-se uso de um *script* escrito em linguagem do *Matlab*. O código realiza a tarefa de acionar a porta serial desejada através do comando *fopen* e envia a instrução desejada pelo comando *fprintf*. As linhas de comando do algoritmo utilizado para executar o movimento dos três motores de passo podem ser vistas na figura Figura 12.

```
%%%%%%% Open serial %%%%%%%

if length (instrfind) > 0
    fclose (instrfind);
end

s = serial('COM1',...
            'BaudRate',9600,...
            'Parity','none',...
            'DataBits',8,...
            'StopBits',1,...
            'Terminator','CR',...
            'Timeout',1)
fopen(s)
disp ('COM-Port opened successfully');

fprintf(s,'%s','@07\n');
fprintf(s,'%s',['@0A ' x ',' vx ',' y ',' vy ',' z ',' vz ',0,30\n']);
```

Figura 12: Linhas de comando do algoritmo escrito em linguagem do Matlab para executar a comunicação do controlador com o computador através de porta serial.

O comando *fprintf('@07$\n')* indica ao controlador que ele irá operar os três motores de passo simultaneamente. Já o comando *fprintf('@0A'x','vx','y','vy','z','vz',0,30\n')* indica quantos passos e com qual velocidade os motores irão se movimentar. As variáveis x e vx são os valores do número de passos e velocidade na direção ϕ, y e vy na direção y e z e vz na direção z. Sabendo-se a relação de transformação entre o número de passos que o motor realiza e a distância que a guia linear se desloca pode-se entrar com os valores de deslocamento em mm (deslocamento linear). A implementação deste sistema de medidas de força pode ser apreciado com mais detalhes em [5]. Uma foto do equipamento completo pode ser vista na Figura 13.

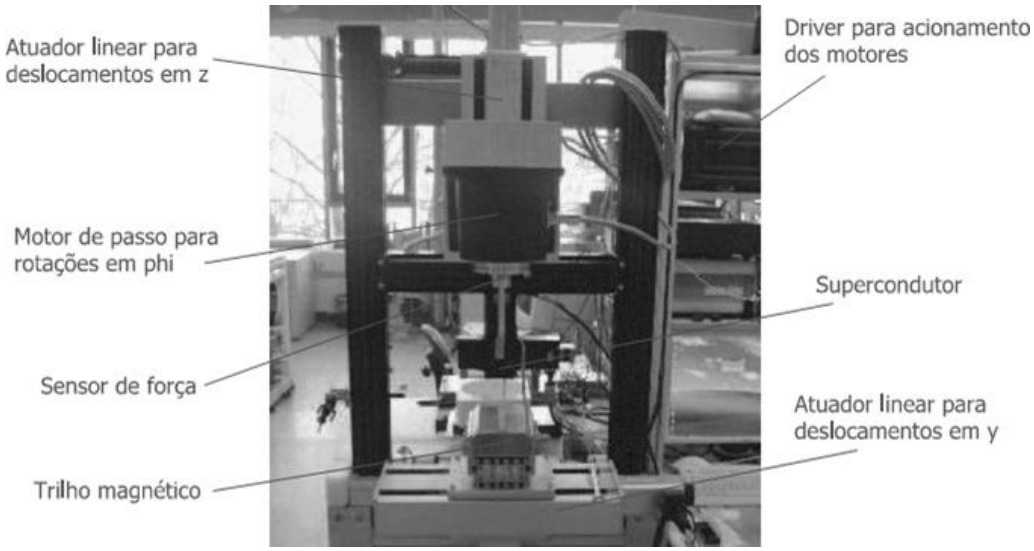

Figura 13: Foto do sistema de medidas de força utilizado.

3.2. Mancal linear supercondutor

Os mancais magnéticos supercondutores baseiam-se na interação entre os supercondutores e imãs permanentes. Além da força de repulsão entre o ímã e o supercondutor devido à propriedade diamagnética do material, pode existir também uma força de atração devida ao aprisionamento de fluxo magnético no interior do supercondutor. Esta força de atração depende da condição de resfriamento e do histórico magnético do supercondutor. Esta característica (intrínseca dos supercondutores do tipo II) confere maior rigidez ao mancal. Os mancais lineares supercondutores são compostos por uma parte magnética e outra supercondutora. A parte magnética do mancal linear utilizado para as medidas consiste em um trilho magnético composto por ímãs permanentes de Nd-Fe-B com dimensões de 50mm x 50mm x 50mm e magnetização na direção y. A força coercitiva do ímã utilizado é de 788 kA/m. Estes ímãs são agrupados juntamente com peças de ferro e o conjunto fixado a uma base de alumínio formando uma configuração do tipo concentrador de fluxo, como pode ser visto na Figura 14.

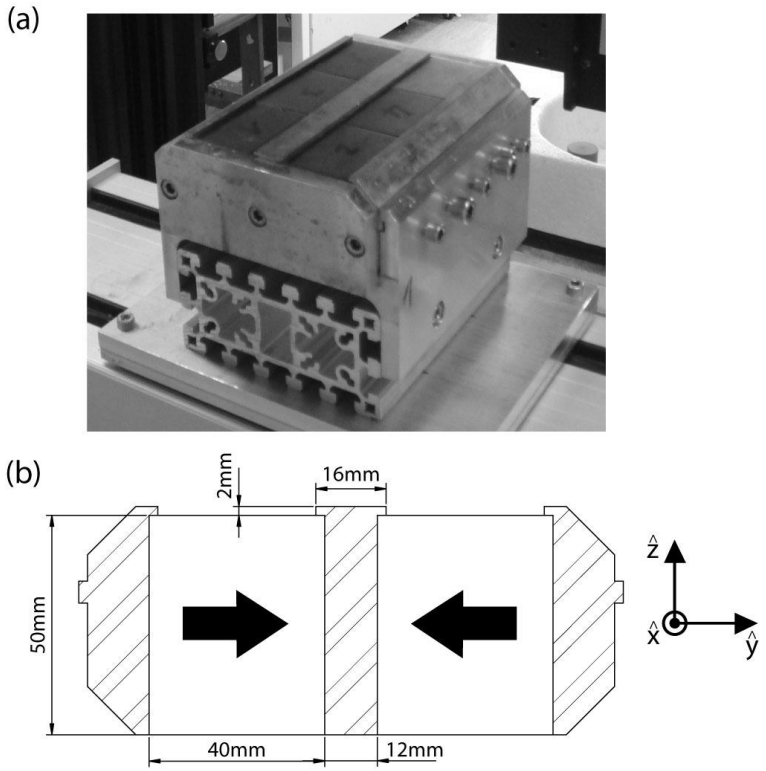

Figura 14: (a) Foto do trilho magnético utilizado para as medidas e (b) suas dimensões. Também é mostrada a orientação magnética dos ímãs permanentes.

Para verificar a qualidade do trilho magnético, foi feito o mapeamento da densidade de fluxo magnético B_z, na superfície do mesmo, ao longo do eixo y. A Figura 15(a) mostra o resultado deste

mapeamento variando a altura z em relação ao trilho. É possível observar que para uma altura de 100 mm em relação ao trilho, o campo gerado pelo mesmo é nulo. Por esta razão, para medidas realizadas com este trilho magnético, a altura inicial de ZFC foi escolhida como sendo igual a 100 mm. Os resultados medidos para algumas alturas podem ser observados através da Figura 15(b).

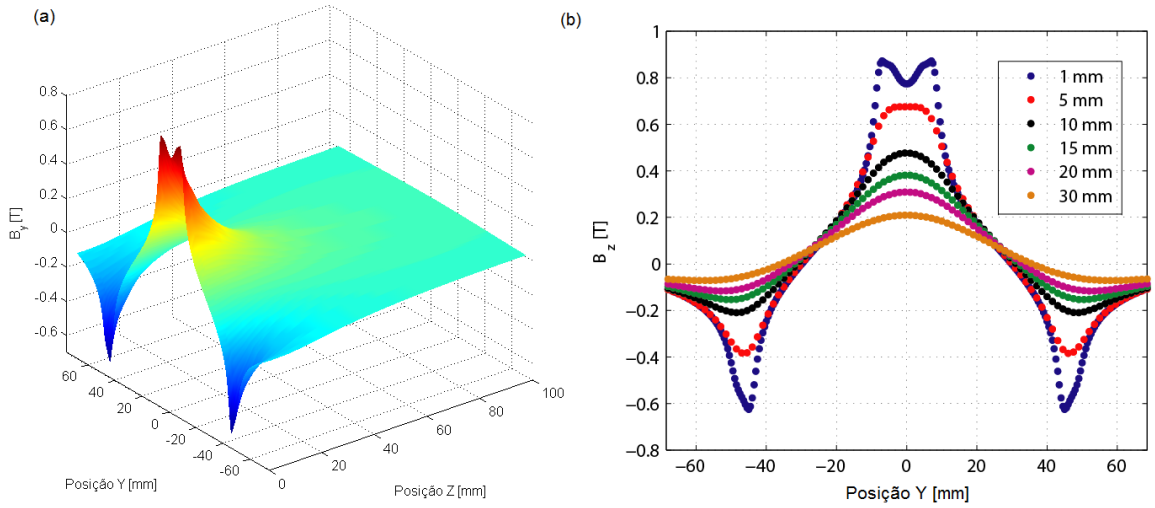

Figura 15: Perfil de campo magnético medido em diferentes alturas do trilho magnético.

Os blocos supercondutores utilizados para realização dos ensaios podem ser vistos na Figura 16 e foram denominados como Amostras 1 e 2. Os blocos são idênticos em tamanho com dimensões de 90 mm x 36 mm x 15 mm. Estas amostras são formadas pelo crescimento de três sementes, fazendo com que o bloco supercondutor resultante apresente três domínios distintos para circulação de corrente com dimensões de 30 mm x 36 mm x 15 mm. As medidas são realizadas com o supercondutor posicionado perpendicularmente ao trilho, ou seja, com a maior aresta ao longo do eixo y.

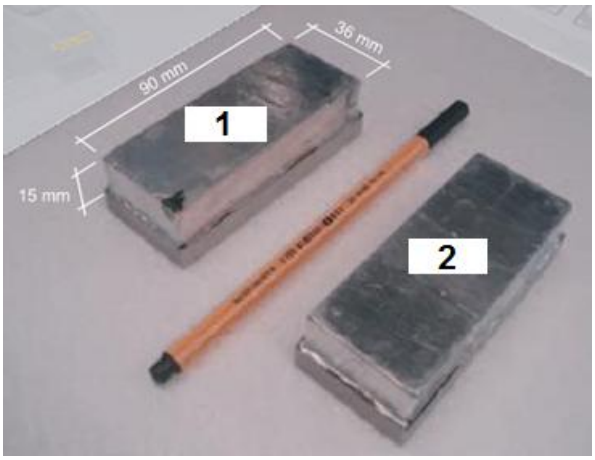

Figura 16: Blocos supercondutores utilizados para as medidas de força

Apesar de idênticos em tamanho e em processo de fabricação, os blocos supercondutores utilizados possuem qualidades diferentes. A Figura 17 mostra o mapeamento da componente z da densidade de fluxo magnético aprisionado no supercondutor resfriado na presença de um ímã de Nd-Fe-B, com dimensões suficientemente grandes para cobrir toda a área do supercondutor. Após a transição o ímã é retirado e o campo aprisionado mapeado. Os domínios em um bloco supercondutor são delimitados por regiões do material onde a densidade de fluxo magnético é nula, ou seja, não há aprisionamento de campo. Como o bloco é formado pelo crescimento de três sementes, este deve apresentar somente três domínios distintos. Contudo percebe-se a presença de mais do que três domínios nas amostras utilizadas. Este aumento indica o aparecimento de rachaduras que dividem um domínio supercondutor em duas ou mais partes. Este fato explica a diferença de qualidade das amostras e as eventuais discrepâncias nos valores de força medidos com cada uma delas.

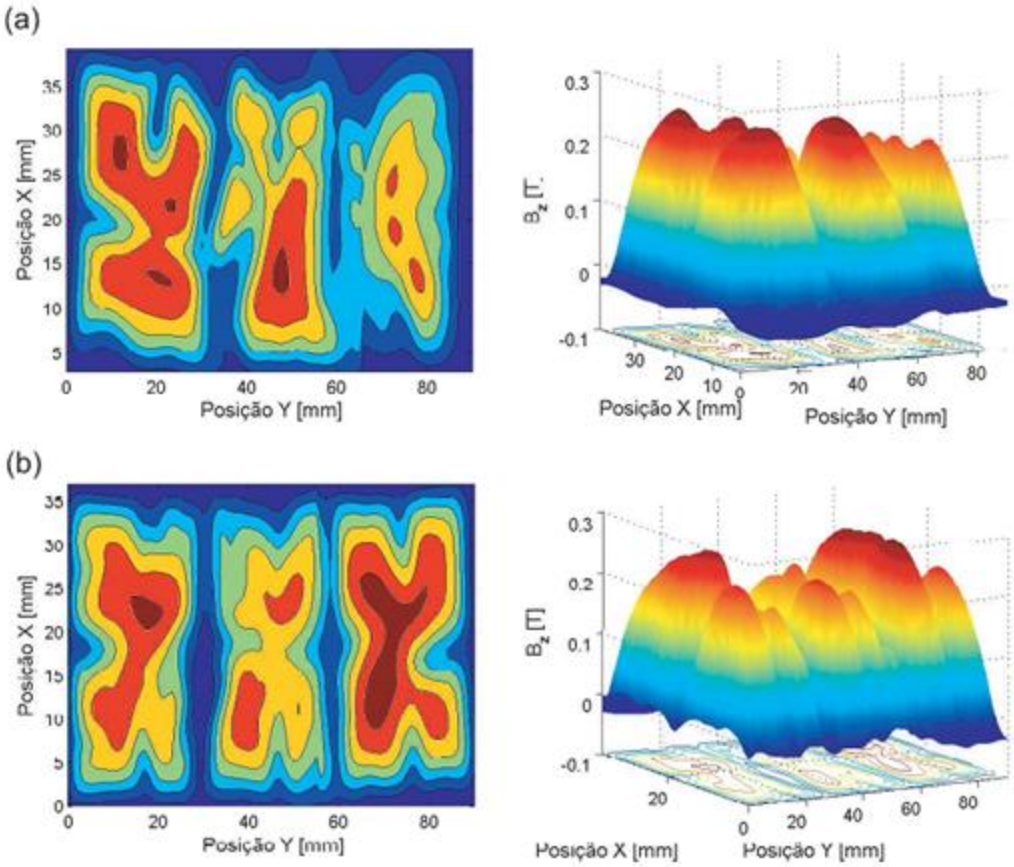

Figura 17: Densidade de fluxo magnético aprisionado devido à presença de um ímã de Nd-Fe-B para as amostras (a) 1 e (b) 2.

4. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de força de levitação para o mancal descrito na seção anterior. Os ensaios de força, independente do tipo de oscilação (deslocamentos laterais ou verticais), são realizados com o supercondutor resfriado na ausência ou na presença de campo magnético. Isto é, se o supercondutor for resfriado a uma altura do trilho magnético em que se considere desprezível o campo gerado pelo mesmo (altura de resfriamento), diz-se que o ensaio foi realizado a *Zero Field Cooling* (ZFC). Porém, se o supercondutor for resfriado próximo ao trilho magnético, onde o campo não pode ser desprezado, diz-se que o ensaio foi realizado em *Field Cooling* (FC). Esses dois processos conferem características diferentes aos mancais. No primeiro caso (ZFC), a força de levitação obtida é maior, porém a estabilidade diminui, pois não existe fluxo inicialmente aprisionado no material. Já para o segundo caso (FC), apesar da força de levitação apresentar um valor menor, ocorre um ganho na estabilidade devido ao aprisionamento inicial de fluxo no interior do supercondutor. Dessa forma, apesar de ser utilizada o processo de FC para operação de um veículo MagLev supercondutor, o ZFC também é considerado nas medidas apresentadas neste capítulo.

4.1. Deslocamentos Laterais

Neste tipo de ensaio é imposto ao supercondutor um deslocamento lateral em relação ao trilho magnético. Para os testes realizados neste trabalho foi utilizada uma amplitude máxima de oscilação de 10 mm. Essa posição, para o mancal em questão, é o seu limite de estabilidade. Para os ensaios de deslocamento lateral, o bloco supercondutor parte de uma posição inicial (Gap inicial) em relação ao trilho onde é resfriado na ausência (ZFC) ou na presença (FC) do campo magnético gerado por este. Após a transição supercondutora, o supercondutor inicia um movimento de aproximação até uma distância de 5 mm (Gap mínimo) do trilho magnético. Então, o supercondutor é deslocado lateralmente para a direita até atingir a amplitude máxima de 10 mm. Em seguida o supercondutor inverte o sentido do movimento e se desloca até a extrema esquerda em y=10 mm. Finalmente este retorna a sua posição inicial onde o deslocamento lateral teve início (y=0 mm). Este ciclo é repetido por mais duas vezes. As Figura 18, Figura **19**, Figura **20**, Figura **21** e Figura **22** apresentam os resultados de medidas realizadas para este ensaio com o supercondutor resfriado na ausência de campo (altura de 100 mm) e à 30 mm, 25 mm, 20 mm e 15 mm, respectivamente.

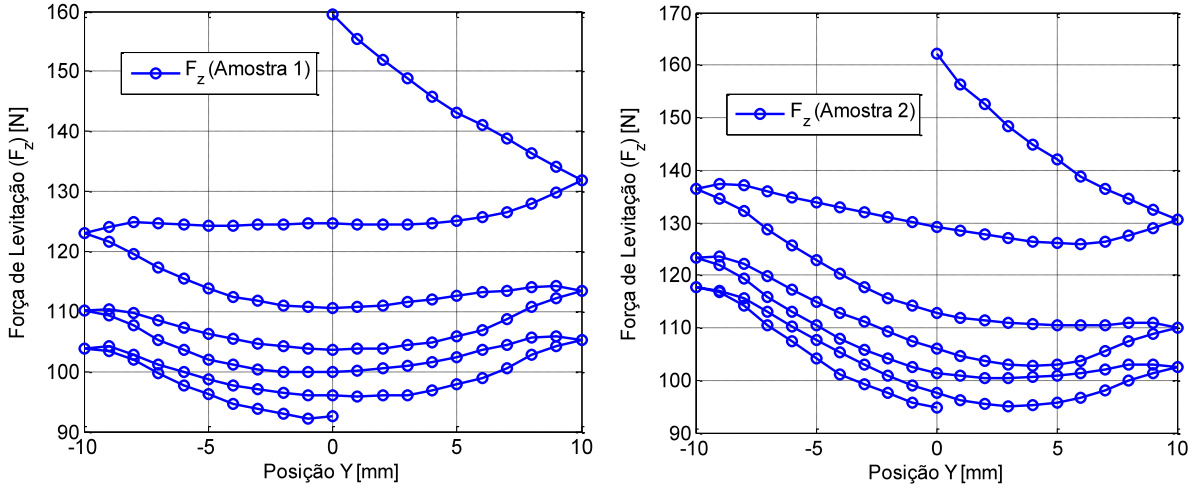

Figura 18: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado em ZFC para a amostras 1 e 2.

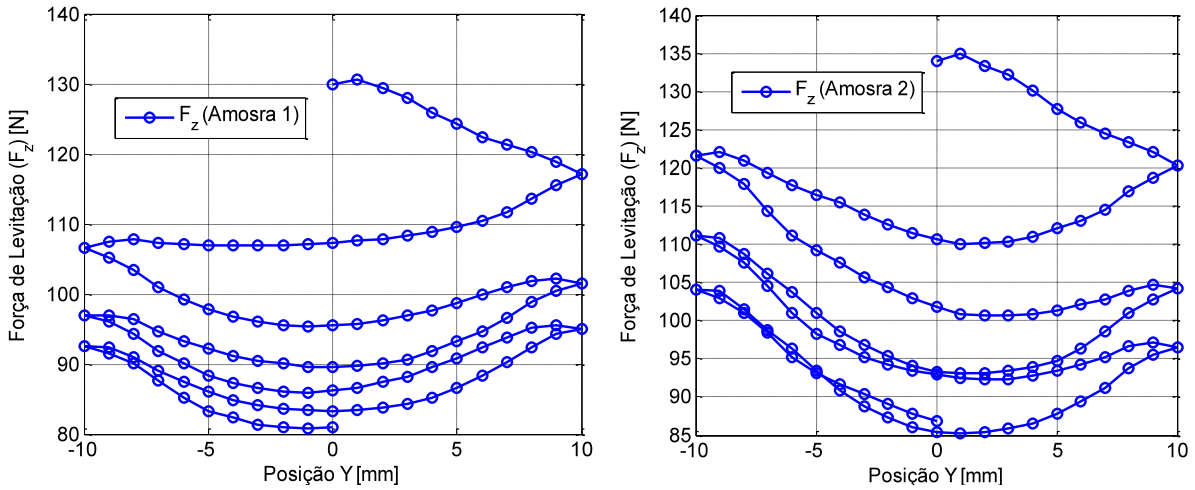

Figura 19: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 30 mm para a amostras 1 e 2.

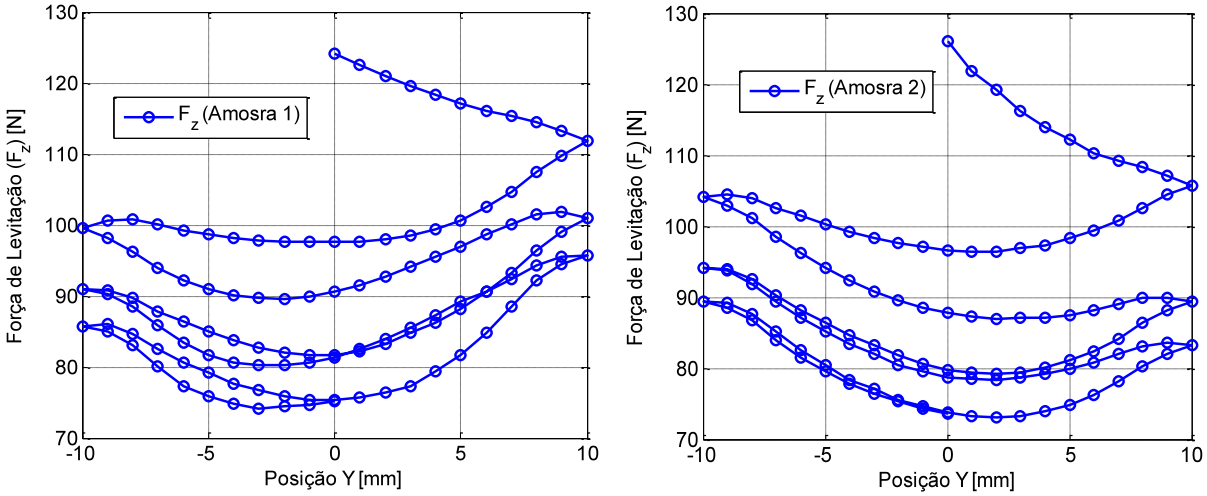

Figura 20: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 25 mm para as amostras 1 e 2.

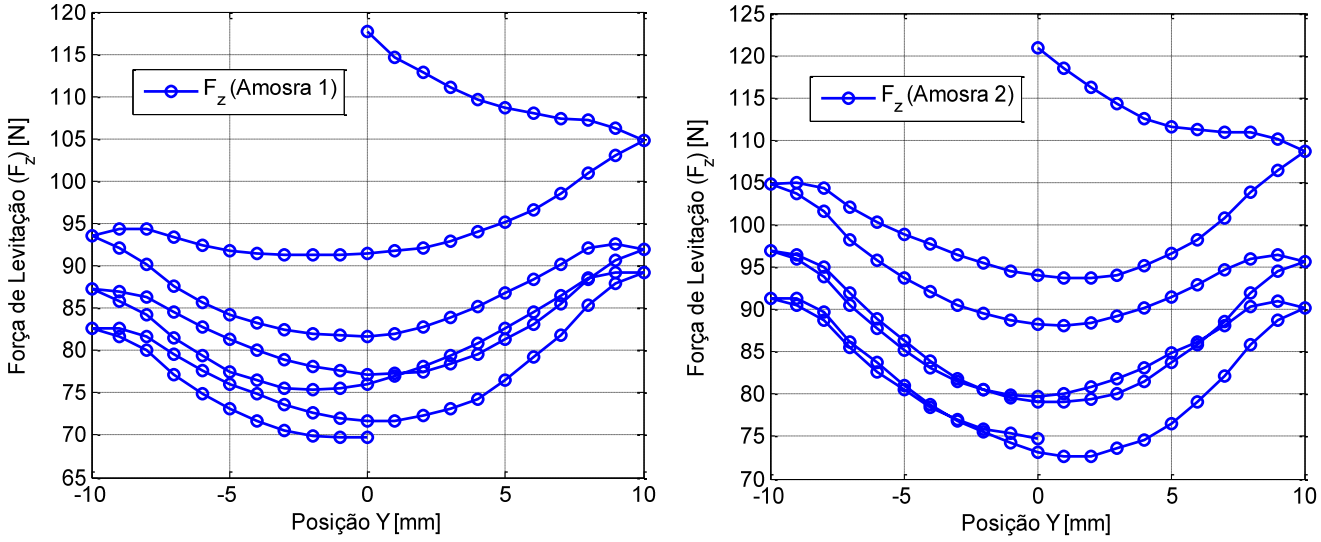

Figura 21: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 20 mm para as amostras 1 e 2.

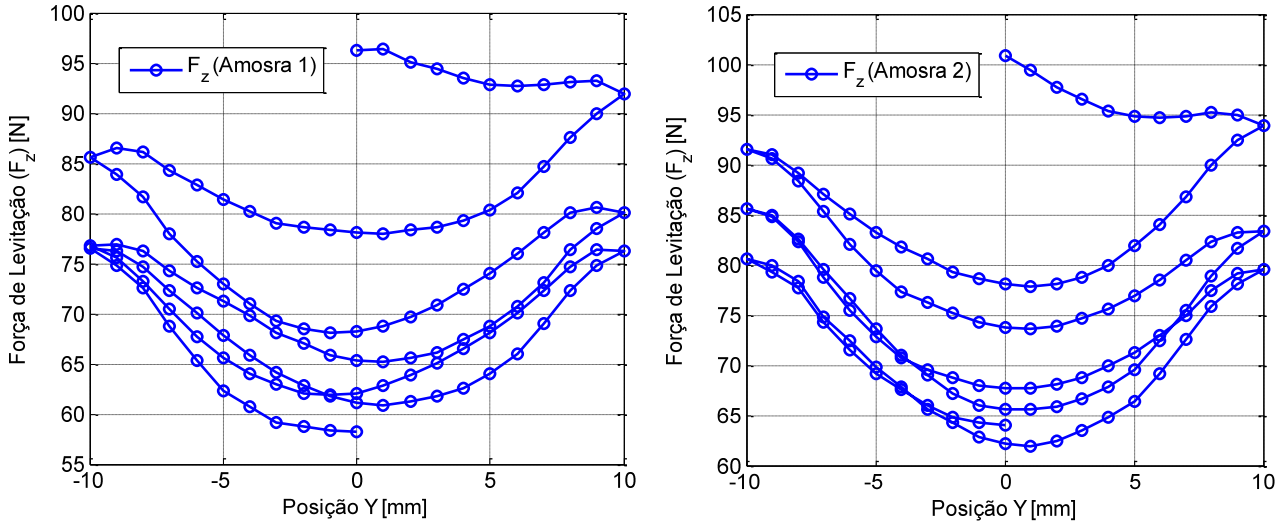

Figura 22: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos laterais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 15 mm para as amostras 1 e 2.

A Tabela 1 mostra um quadro comparativo das medidas realizadas para as duas amostras. É apresentada a força máxima de levitação e a força final, após os três ciclos de deslocamento, para cada um dos ensaios. Na última coluna da tabela é mostrado o decaimento percentual da força. De uma maneira geral, este decaimento está em torno de 40% do valor máximo da força de levitação. Assim, dependendo do valor da amplitude de deslocamento previsto para o supercondutor, a força máxima de levitação deve ser projetada em até 40% do valor inicial.

Tabela 1: Tabela comparativa entre a força de levitação máxima e final para diferentes tipos de ensaio com deslocamento lateral

FORÇA MÁXIMA DE LEVITAÇÃO (N)	TIPO DE ENSAIO	AMOSTRA SUPERCONDUTORA	FORÇA FINAL DE LEVITAÇÃO (N)	TAXA DE DECAIMENTO DA FORÇA (%)
160,6	ZFC	*Amostra supercondutora 1*	92,53	42,4%
129,9	FC - 30 mm		80,95	37,6%
124,09	FC - 25 mm		75,26	39,3%
117,7	FC - 20 mm		69,67	40,8%
96,21	FC - 15 mm		58,26	39,4%
162,2	ZFC	*Amostra supercondutora 2*	94,86	41,5%
134	FC - 30 mm		85,44	36,2%
126,13	FC - 25 mm		73,62	41,6%
120,8	FC - 20 mm		73,21	39,4%
100,8	FC - 15 mm		62,13	38,4%

4.2. Deslocamentos Verticais

Neste tipo de ensaio é imposto ao supercondutor oscilações verticais em relação ao trilho magnético. Para os testes realizados neste trabalho foi utilizada uma amplitude máxima de oscilação de 5 mm. Para os ensaios de deslocamento vertical, o bloco supercondutor parte de uma posição inicial (Gap inicial) em relação ao trilho onde é resfriado na ausência (ZFC) ou na presença (FC) do campo magnético gerado por este. Após a transição supercondutora, o supercondutor inicia um movimento de aproximação até uma distância de 10 mm (Gap mínimo) do trilho magnético. Então, o supercondutor é deslocado verticalmente para baixo até atingir a amplitude máxima de 5 mm. Em seguida o supercondutor inverte o sentido do movimento e se desloca até o limite superior em z=15 mm. Finalmente este retorna a sua posição inicial onde o deslocamento vertical teve início (z=10 mm). Este ciclo é repetido por mais duas vezes, como no caso do deslocamento lateral. As Figura 23, Figura **24**, Figura **25** e Figura **26** apresentam os resultados de medidas realizadas para este ensaio com o supercondutor resfriado na presença de campo à 35 mm, 30 mm, 25 mm e 20 mm, respectivamente.

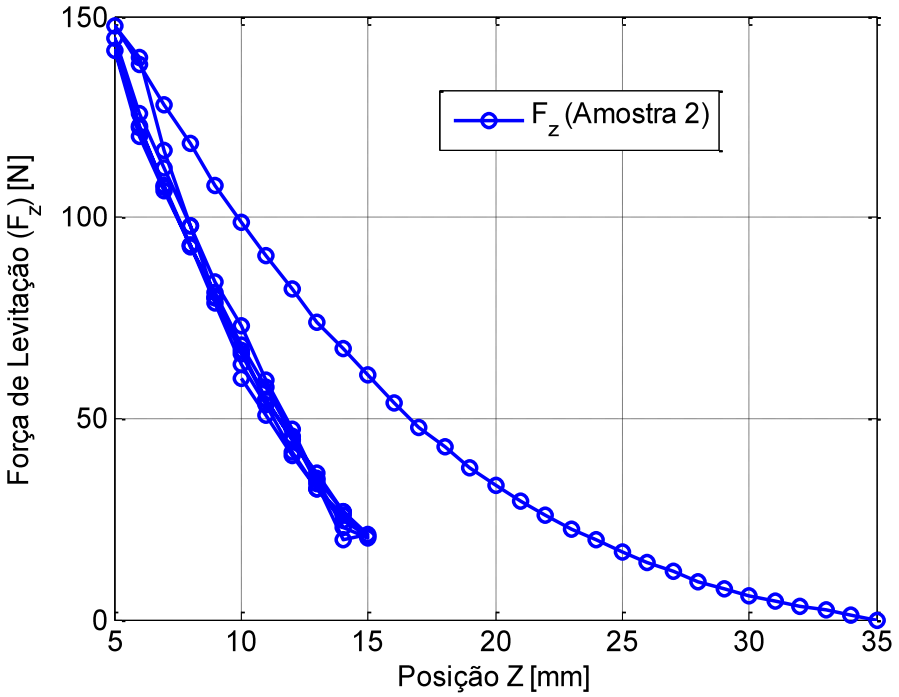

Figura 23: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 35 mm para a amostra 2.

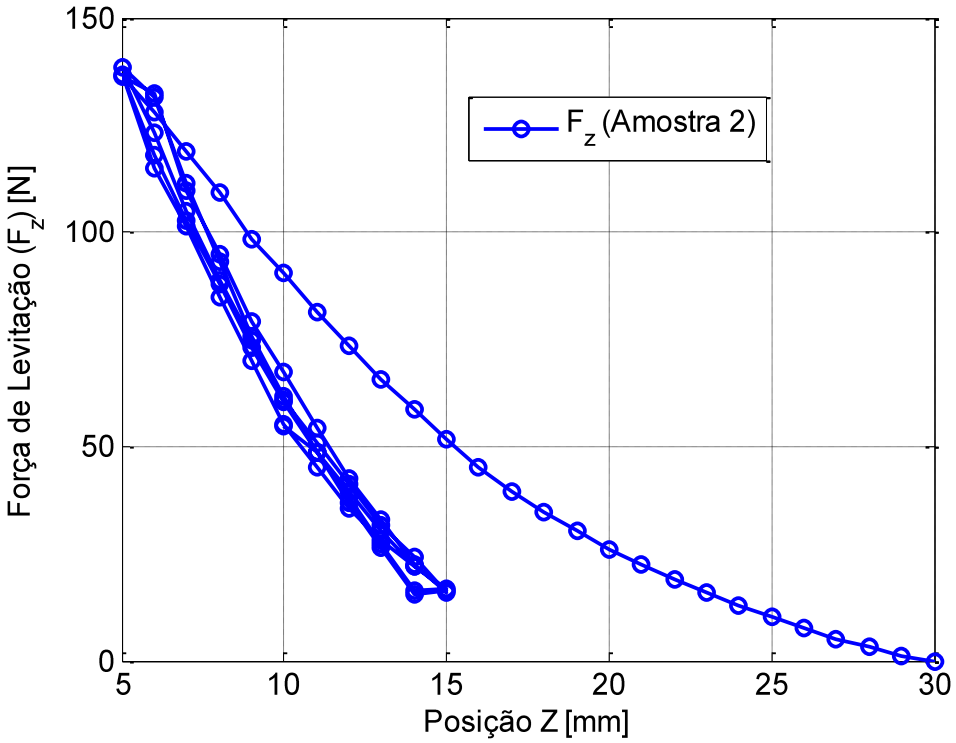

Figura 24: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 30 mm para a amostra 2

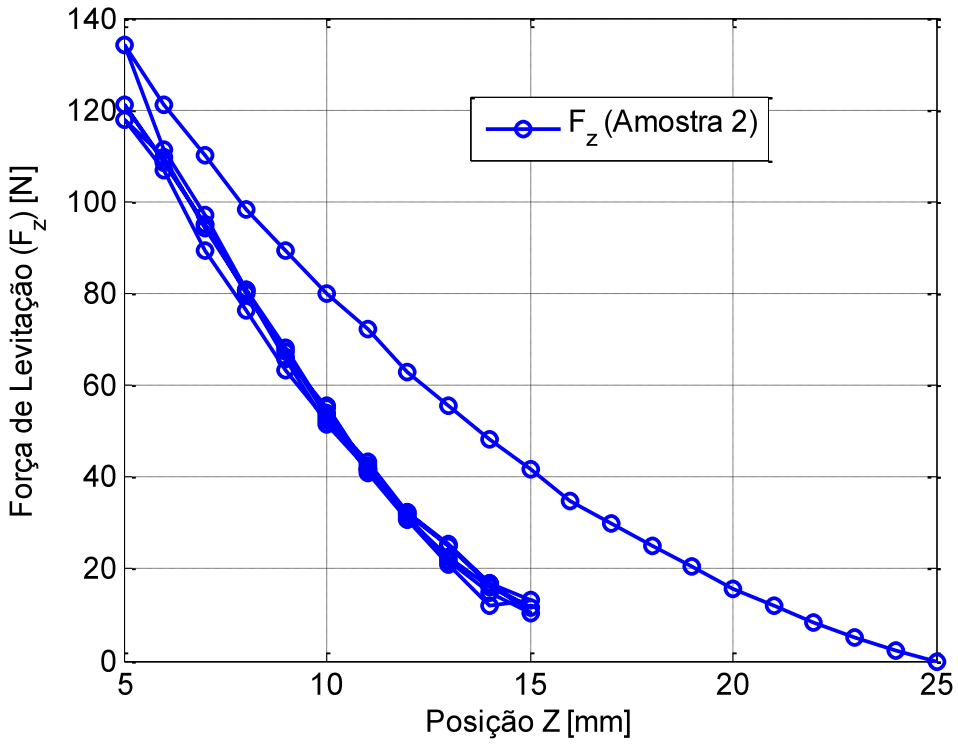

Figura 25: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 25 mm para a amostra 2

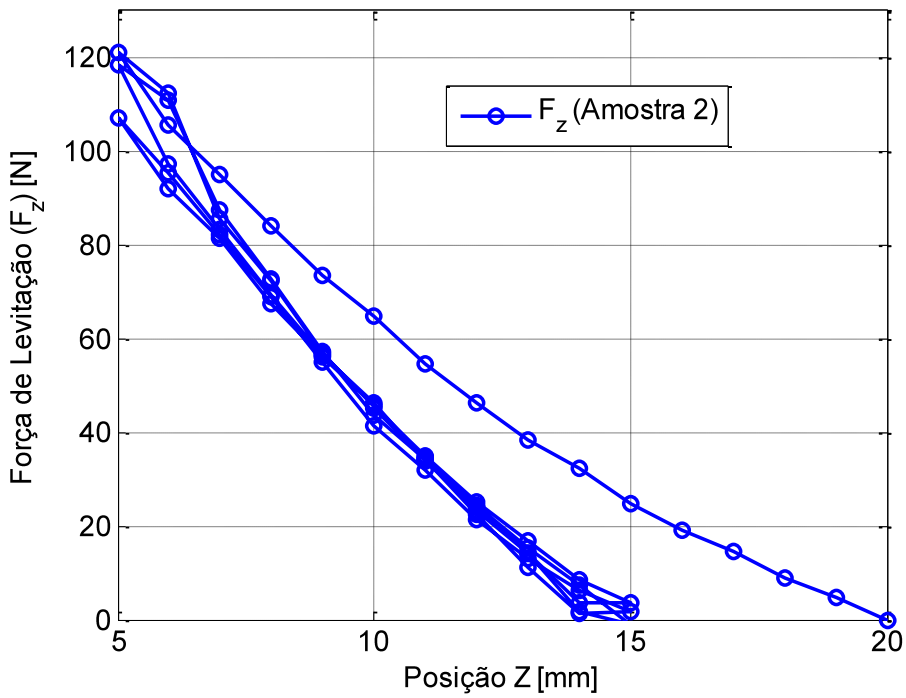

Figura 26: Comportamento da força de levitação durante três ciclos de deslocamentos verticais para ensaio realizado com altura de resfriamento de 20 mm para a amostra 2

A Tabela 2 mostra um quadro comparativo das medidas realizadas para a amostra 2. É apresentada a força máxima de levitação e a força final, após os três ciclos de deslocamento vertical, para cada um dos ensaios em FC. Assim como nos ensaios de deslocamento lateral, na última coluna da tabela é mostrado o decaimento percentual da força. Porém, diferente do que se pode perceber no caso anterior, para este tipo de oscilação, o decaimento percentual da força é cerca de 4 vezes menor (percentual máximo de 10%). Assim, o efeito de carga e descarga (variando a altura de trabalho), não exerce muita influência no valor da força de levitação, como no caso de deslocamentos laterais, que devem ser abordados com mais cuidado. É importante ainda ressaltar que, após o supercondutor realizar o primeiro ciclo de deslocamento, este entra em um regime elástico, conforme pode ser observado nos gráficos apresentados acima.

Tabela 2: Tabela comparativa entre a força de levitação máxima e final para diferentes tipos de ensaio com deslocamento vertical

FORÇA MÁXIMA DE LEVITAÇÃO (N)	TIPO DE ENSAIO	AMOSTRA SUPERCONDUTORA	FORÇA FINAL DE LEVITAÇÃO (N)	TAXA DE DECAIMENTO DA FORÇA (%)
147,7	**FC - 35 mm**	***Amostra supercondutora 2***	**141,7**	**4%**
138,4	**FC - 30 mm**		**136,9**	**1%**
134	**FC - 25 mm**		**122**	**8%**
121,1	**FC - 20 mm**		**108**	**10%**

5. Conclusões

Este trabalho apresentou o estudo do comportamento da força de levitação magnética de um mancal linear supercondutor devido a oscilações do supercondutor em torno do ponto de equilíbrio. Este mancal é composto por um supercondutor e um trilho magnético de ímãs permanentes cujas características foram apresentadas no capítulo 3. Essas oscilações, que podem ser em forma de deslocamentos laterais ou verticais, podem influenciar no valor final da força de levitação, fazendo com que o decréscimo da mesma seja levado em consideração no projeto de um veículo de levitação supercondutora. Para investigação deste fenômeno utilizou-se um sistema de medidas de força, cujas características estão descritos detalhadamente também no capítulo 3. Os testes foram realizados considerando o resfriamento na ausência (Z*ero Field Cooling* - ZFC) e na presença (F*ield Cooling* - FC) de campo magnético, este último para diferentes alturas de resfriamento.

O estudo do decaimento da força de levitação magnética em um mancal linear supercondutor será de grande valia para o desenvolvimento de veículos MagLev's utilizando este tipo de tecnologia. Os resultados obtidos pelos ensaios permitem determinar qual o percentual de queda da força de levitação em função de um dado tipo de oscilação o qual deve ser levado em consideração na elaboração do projeto. As medidas foram realizadas utilizando-se duas amostras supercondutoras denominadas de 1 e 2. Os primeiros testes foram feitos impondo ao supercondutor deslocamentos laterais com amplitude máxima de 10 mm e com um total de três ciclos. Estes testes são feitos com o intuito de simular o efeito gerado quando o veículo realiza uma curva. Os resultados mostraram uma queda de aproximadamente 40% em relação à força máxima de levitação, cujo valor é obtido quando o supercondutor é inicialmente aproximado ao trilho magnético após ter efetuado a transição. Assim, dependendo do valor da amplitude de deslocamento previsto para o supercondutor em um sistema de levitação deste tipo, a força máxima de levitação deve ser projetada em até 40% do seu valor inicial. Um segundo passo consistiu na investigação do comportamento da força de levitação devido a deslocamentos verticais do supercondutor em relação ao trilho magnético. Este movimento visa simular a carga e descarga do veículo devido à entrada e saída de passageiros do mesmo. Os resultados para estes ensaios mostraram uma queda percentual na força com valor máximo de 10% (em alguns casos a queda foi de apenas 1%). Isso nos mostra que este tipo de oscilação não exerce muita influência no valor final da força de levitação, como no caso de deslocamentos laterais, que devem ser abordados com mais cuidado.

Como proposta de trabalhos futuros sugere-se a investigação mais precisa do decaimento da força de levitação impondo ao supercondutor oscilações combinadas de deslocamentos laterais, verticais e também rotacionais em relação ao trilho magnético. Esta análise também pode ser

complementada com o estudo da influência da relaxação das linhas de fluxo magnético (*flux creep*) aprisionadas no interior do supercondutor na força de levitação supercondutora.

6. Referências

[1] M. D. A. dos Santos, "Sincronização da operação do protótipo do trem de levitação magnética MagLev-Cobra". Dissertação de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2010).

[2] G. C. da Costa, "Estudo da levitação magnética e determinação da corrente crítica de blocos supercondutores de alta T_c pelo método dos elementos finitos", Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2005).

[3] R. B. Kasal, "Simulação de supercondutores pelo modelo de estado crítico", Dissertação de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2006).

[4] G. G. Sotelo, "Modelagem de Supercondutores aplicada ao projeto de mancais magnéticos", Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2007).

[5] D. H. N. Dias, "Modelagem de mancais lineares supercondutores considerando o resfriamento na presença de campo magnético", Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2009).

[6] A. Sanchez, N. Del Valle, E. Pardo, D.-X. Chen e C. Navau, "Magnetic levitation of superconducting bars", Journal of Applied Physics 99, 113904 (2006).

[7] N. Del-Valle, A. Sanchez, C. Navau e D.-X. Chen, "Lateral-displacement influence on the levitation force in a superconducting system with translational symmetry", Applied Physics Letters 92, 042505 (2008).

[8] H. Kamerling Onnes, "The Superconductivity of Mercury", Comm. Phys. Lab., Univ. Leiden 120 b, 122 b, 124 e (1911).

[9] W. Meissner and R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit", Naturwissenschaften 21, 787 (1933).

[10] F. and H. London, "The electromagnetic equations of the superconductor", Proc. Roy. Soc. (London) A 149, 71 (1935).

[11] V. L. Ginzburg and L. D. Landau, "On the theory of superconductivity" Zh. Eksperim. iTeor. Fiz. 20, 1064 (1950).

[12] L. N. Cooper, "Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas", Phys. Rev. 104, 1189 (1956).

[13] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, “Microscopic theory of superconductivity” Phys. Rev. 106, 162 (1957).

[14] T. Timusk, and B. Statt, “The pseudogap in high temperature superconductors: an experimental survey”, Rep. Prog. Phys. 62, 61 (1999).

[15] C. P. Bean, “Magnetization of hard superconductors”, Physical Review Letters, vol. 8, pp. 250-253, (1962).

[16] J. G. Bednorz, and K. A. Müller, “Possible highTc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”, Z. Phys. B 64, 189 (1986).

[17] A. M. Luiz, *Aplicações de Supercondutividade*. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 1a ed. (1992).

[18] D. Larbalestier et al, “High-tc superconducting materials for electric power applications”, Nature, vol. 414, pp. 368-377, (2001).

[19] A. A. Abrikosov, “On the magnetic properties of superconductors of the second group”, Soviet Physics (JETO), vol. 5, p. 1174 (1957).

[20] R. M. Stephan, A. C. Ferreira, M. A. Cruz Moreira, R. de Andrade Jr. and R. Nicolsky, “The Brazilian SQL MAGLEV Train Prototype”, Proceedings of ISMST8 - 8th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Dresden, Alemanha, pp. 39-44, 26-28 (2005).