



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Desenvolvimento de Mancais Magnéticos Supercondutores

Leonardo Luiz de Souza Santos

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Rubens de Andrade Junior, D. Sc.

Rio de Janeiro

Dezembro de 2011

Desenvolvimento de Mancais Magnéticos Supercondutores

Leonardo Luiz de Souza Santos

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.

Aprovada por:

Rubens de Andrade Junior, D. Sc.

(Orientador)

Daniel Henrique Nogueira Dias, D. Sc.

(Co-orientador)

Antonio Lopes de Souza, Ph. D.

Felipe Sass, M. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2011

Agradecimentos

A Ele toda honra, glória, louvor e adoração. Obrigado, meu Deus, por permitir a realização de mais esse sonho na minha vida. Tu és fiel Senhor!

Aos meus pais, José Mariano e Maria Amélia, pelo amor incondicional, pelo exemplo de vida, pela confiança e incentivo todos esses anos. Obrigado a você, mãe, que diversas vezes renunciou aos seus desejos para realizar os meus. A você, pai, eu agradeço por me ensinar a amar minha profissão e transmitir os conceitos fundamentais de um bom profissional. Amo vocês!

Ao meu irmão, Guilherme Santos, por toda amizade e cumplicidade. Obrigado por estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

Aos meus avós, Guilherme Azevedo e Ana da Conceição pela atenção e carinho dispensados a mim durante toda minha criação. Amo vocês!

A minha noiva, Raquel Rezende, pelo amor, carinho, cumplicidade e companheirismo dispensados a mim. Obrigado por fazer parte dessa vitória, e estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida. O melhor de Deus ainda está por vir. Eu te amo!

Aos meus orientadores, Rubens de Andrade e Daniel Henrique, pela orientação, amizade e dedicação. Obrigado por permitirem que eu fizesse parte dessa equipe.

Aos amigos do Laboratório de Aplicação de Supercondutores, Renan Fernandes, Flávio Goulart, Jardel Camelo, Felipe Sass, Felipe Costa, Alan Endalécio e Marcos Dantas pela amizade e momentos de descontração sempre presentes no dia a dia.

Aos amigos do curso de Engenharia Elétrica, Márcio Gabriel, João Pedro, Gustavo Viana e Beatriz Pamplona. Em especial agradeço aos amigos, Thiago Dultra e Isabela Fernanda, a parceria de vocês tornou este curso mais ameno e agradável. A todos, obrigado pela troca de conhecimentos adquiridos nos momentos de estudo, pela alegria quando em lazer e pelo apoio em meio ao desespero das madrugadas.

À coordenação, professores e funcionários do curso de graduação em Engenharia Elétrica pela colaboração e orientação nos momentos que mais precisei.

Então tomou Samuel uma pedra, e a pôs entre Mizpá e Sem, e chamou-lhe Ebenézer; e disse: Até aqui nos ajudou o SENHOR.

1 Samuel 7:12

Resumo do Projeto Final em Engenharia Elétrica apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

DESENVOLVIMENTO DE MANCAIS MAGNÉTICOS SUPERCONDUTORES

Leonardo Luiz de Souza Santos

Dezembro de 2011

Orientador: Rubens de Andrade Junior, D. Sc.

Co-orientador: Daniel Henrique Nogueira Dias, D. Sc.

O objetivo principal deste trabalho é estudar e pesquisar a melhor geometria de posicionamento dos blocos supercondutores em um mancal magnético supercondutor (MMS), a fim de obter um trilho de ímãs que extraia a máxima estabilidade e força de levitação do conjunto.

O projeto aqui exposto apresenta o uso de um sistema automatizado de medidas de forças magnéticas em um mancal linear supercondutor. Tais forças são provenientes da interação entre blocos supercondutores resfriados a temperatura de ebulição do nitrogênio líquido com campos magnéticos gerados por trilhos de ímãs permanentes.

O estudo dessa força magnética de interação é proveniente da necessidade de comparação de diferentes configurações de trilhos magnéticos para analisar uma configuração ótima a ser implementada no veículo de levitação magnética (MagLev Cobra).

Para a realização dos ensaios foi utilizado um sistema de medidas de força capaz de realizar movimentos verticalmente nas direções ascendentes e descendentes. Para a parte magnética do mancal supercondutor utilizou-se uma seção de um trilho magnético. Foram utilizados 8 amostras supercondutoras de mesmo tamanho, porém de fabricações distintas divididas em dois conjuntos de 4 blocos, o Conjunto 1 e o Conjunto 2. As medidas realizadas mostraram um aumento percentual em torno de 24% para o ensaio de ZFC e 26% para o ensaio de FC a 35mm do Conjunto 2 para com o Conjunto 1. Assim, este aumento deve ser levado em consideração para o desenvolvimento de um mancal magnético supercondutor, MMS.

Sumário

Sumário	vi
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Tipos de Levitação	2
1.2.1 Levitação Eletrodinâmica (EDL).....	2
1.2.2 Levitação Supercondutora (SML).....	3
1.2.3 Levitação Eletromagnética (EML)	3
2 Supercondutividade.....	4
2.1 Resumo Histórico.....	4
2.2 Supercondutores do tipo I	6
2.3 Supercondutores do tipo II	7
2.4 Redes de Abrikosov	8
3 Apresentação do Sistema de Medidas e seus Equipamentos	10
3.1 Equipamentos Utilizados no Sistema	10
3.1.1 Placa de Aquisição de Dados	10
3.1.2 Célula de Carga	11
3.1.3 Fonte de Tensão.....	12
3.1.4 Motor de Passo.....	13
3.1.5 Cola EIlsworth STYCAST 2850FT / Catalyst 23LV	13
3.1.6 Blocos Supercondutores	14
3.1.7 Trilho Magnético (TM)	15
3.2 Princípios de Funcionamento do Sistema	16
4 Resultados	19
4.1 Conjunto1.....	21
4.1.1 Posição Relativa ao Trilho: Paralela.....	21
4.1.2 Posição Relativa ao Trilho: Perpendicular	23
4.2 Conjunto 2.....	25

4.2.1	Posição Relativa ao Trilho: Paralela.....	25
4.2.2	Posição Relativa ao Trilho: Perpendicular.....	28
4.3	Resumo das Medidas e Discussão	29
4.4	Ensaio de Afastamento	31
4.4.1	Conjunto 3: FC a 30mm.....	32
4.4.2	Conjunto 3: FC a 35mm.....	34
4.4.3	Conjunto 4: FC a 30mm.....	35
4.4.4	Conjunto 4: FC a 35mm.....	36
5	Conclusão.....	37
6	Referências Bibliográficas.....	38
7	Anexos.....	40
7.1	Technical Data Sheet STYCAST 2850FT / Catalyst 23LV.....	40
7.2	Permissão para utilização da figura 1.....	42
7.3	Configuração da Revolução do Motor de Passo	43

Índice de Figuras

Figura 1- Trem de levitação eletrodinâmica japonês (JR-MAGlev, MLX01)	2
Figura 2 – Levitação Supercondutora no LASUP.....	3
Figura 3 – Experiência de Levitação Eletromagnética desenvolvido no LASUP.....	4
Figura 4 - Ilustração do fenômeno da supercondutividade	5
Figura 5 - Comparação do fluxo magnético no interior de um supercondutor tipo I antes e após ser resfriado abaixo de T_c	6
Figura 6 - Transição supercondutora do Hg - 1212.....	6
Figura 7 - Fluxo Magnético no interior do supercondutor para uma temperatura T	7
Figura 8 - Rede de Vórtices distribuída homoganeamente em um supercondutor do tipo II no estado misto.....	9
Figura 9 - Vista geral do Sistema de Medidas de Força Magnética (SisMeFoM)	10
Figura 10 – Foto Ilustrativa da Placa de Aquisição PCI-6220 e placa terminal, respectivamente	11
Figura 11 – Célula de Carga Alfa Instrumentos.....	12
Figura 12 – Foto da fonte de tensão regulada ligada em série ICEL, modelo PS-4000	12
Figura 13 – Motor de passo linear.....	13
Figura 14 – Imagem Cola EIlsworth STYCAST 2850FT / Catalyst 23LV	14
Figura 15 – Foto do bloco supercondutor, comparando-o a uma tampa de caneta “BIC”	15
Figura 16 – Configuração do Trilho Magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach montada e testada no LASUP.....	16
Figura 17 – Protótipo do trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach montado para os ensaios da força de levitação magnética	16
Figura 18 – Programa para o Sistema de Medidas de Força Magnética(SisMeFoM) feito em linguagem LabView utilizado na realização do procedimento experimental...	17
Figura 19 – Posição relativa dos Conjuntos em relação ao TM. (a) Posição perpendicular; (b) Posição paralela.....	19

Figura 20 – Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (ZFC) a 100mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	21
Figura 21 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	22
Figura 22 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	22
Figura 23 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	23
Figura 24 - Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (ZFC) a 100mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	23
Figura 25 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	24
Figura 26 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	24
Figura 27 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	25
Figura 28 - Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (FC) a 100mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	26
Figura 29 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	26
Figura 30 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	27
Figura 31 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.	27
Figura 32 - Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (FC) a 100mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	28
Figura 33 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	28
Figura 34 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	29
Figura 35 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.....	29

Figura 36 – Ilustração do afastamento de 1,5 cm para a esquerda e para a direita de cada um dos blocos supercondutores.....	32
Figura 37 – Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 3.	33
Figura 38 - Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 3.	34
Figura 39 - Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 4.	35
Figura 40 - Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 4.	36

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tabela comparativa da força de levitação máxima para os ensaios de ZFC e FC, ambos para o Conjunto 1 e Conjunto 2.	30
Tabela 2 – Tabela comparativa do incremento de força magnética de levitação para os ensaios de ZFC e FC, entre o Conjunto 1 e Conjunto 2.	30
Tabela 3 - Tabela comparativa do incremento de força magnética de levitação para os ensaios de ZFC e FC, nas posições paralela e perpendicular.	31
Tabela 4 – Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 3.	33
Tabela 5 - Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 3.	34
Tabela 6 - Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 4.	35
Tabela 7- Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 4.	36

Abreviaturas

ATZ - Adelwitz Technologiezentrum GmbH

FC – Field Cooling

Hc – Campo Magnético Crítico

Jc – Densidade Crítica de Corrente

Lasup – Laboratório de Aplicações de Supercondutores

MMS – Mancais Magnéticos Supercondutores

SisMeFoM – Sistema de Medidas de Força Magnética

Tc – Temperatura Crítica

TM – Trilho Magnético

ZFC – Zero Field Cooling

1 Introdução

O projeto tem por objetivo averiguar a melhor geometria de posicionamento dos supercondutores em um mancal magnético supercondutor, MMS, a fim de obter um trilho de ímãs que extraia a máxima estabilidade e força de levitação do conjunto.

Para o desenvolvimento do trabalho fez-se necessário utilizar os conhecimentos teóricos sobre supercondutividade adquiridos no Laboratório de Aplicação de Supercondutores (Lasup – COPPE - UFRJ). Posteriormente, estudar o funcionamento de um programa de controle e automação baseado em linguagem de programação LabView.

Em seguida, com o auxílio do técnico do laboratório, Ocione José Machado, construiu-se uma peça em G10 a fim de fixar os blocos supercondutores com diferentes posicionamentos e uma segunda peça com intuito de armazenar o nitrogênio líquido despejado sobre o conjunto. A partir deste momento iniciou-se a etapa do projeto das medidas das forças de levitação magnética.

1.1 Motivação

Mancais magnéticos supercondutores são utilizados em armazenadores cinéticos de energia (Flywheel) e em veículos de levitação magnética (MagLev). Mancais são componentes mecânicos existentes em qualquer estrutura com movimento de rotação (mancais rotativos) ou translação (mancais lineares) com a função de sustentar o movimento com o mínimo de atrito. Para aplicações que necessitem de baixíssimo atrito e níveis de ruídos desprezíveis os MMS representam uma excelente alternativa.

O Lasup vem desenvolvendo um veículo de levitação magnética cujo MMS é composto de um trilho magnético (TM) e supercondutores, que ficam dentro de criostatos. Um dos principais parâmetros deste sistema é a força de levitação que surge da interação entre o supercondutor e o TM. Para o desenvolvimento de um MMS, deve-se otimizar a força de levitação buscando uma redução de custo que está diretamente relacionado com o material supercondutor e o ímã permanente usado para construção do TM.

1.2 Tipos de Levitação

As técnicas de levitação magnética podem ser empregadas em sistemas de transporte de alta velocidade, e também em sistemas de transportes públicos urbanos cada vez mais eficientes e com custos de implantação competitivos. As técnicas de levitação em aplicações de transporte de massa podem ser subdivididas em três grupos que serão descritos a seguir.

1.2.1 Levitação Eletrodinâmica (EDL)

Baseia-se na indução de correntes em um circuito em movimento na região de um campo magnético constante ou na variação de fluxo vista por um circuito estático. De acordo com a Lei de Lenz, esta corrente induzida cria um fluxo magnético oposto à variação do fluxo vista pelo circuito. O campo proveniente da corrente induzida opõe-se ao campo magnético existente, resultando em uma força magnética repulsiva que é utilizada para a levitação do corpo.

Um exemplo deste tipo de levitação é o trem japonês de levitação magnética de alta velocidade, implantado em uma linha dupla para demonstração e teste, com extensão de 18,4km, em Yamanashi, localizado entre Tóquio e Osaka [1], fig. 1.



Figura 1- Trem de levitação eletrodinâmica japonês (JR-Maglev, MLX01)

1.2.2 Levitação Supercondutora (SML)

A tecnologia da levitação magnética supercondutora (SML) baseia-se na propriedade diamagnética dos supercondutores para a exclusão do campo magnético do interior dos mesmos. No caso dos supercondutores tipo II, esta exclusão é parcial, o que diminui a força de levitação, entretanto proporciona maior estabilidade, graças ao chamado efeito “pinning”. Isto representa maior vantagem sobre outras tecnologias supercondutoras como o EDL e EML, que será abordado a seguir. O principal projeto que se utiliza deste tipo de tecnologia é o MagLev-Cobra desenvolvido no Laboratório de Aplicação de Supercondutores na UFRJ/Brasil [2].

Obtêm-se como vantagem a utilização da tecnologia SML pelo fato de utilizar trilhos magnéticos que consomem menos energia, menor custo de manutenção e operação. Contudo, a levitação supercondutora necessita de uma linha de ímãs, a fim de promover o efeito diamagnético durante todo percurso do trem, e a aquisição deste material apresentaria um custo elevado para o projeto. Tendo em vista um transporte urbano de pequenas distâncias e em baixa velocidade a tecnologia SML, torna-se mais atraente e possível de ser implantada, fig. 2.



Figura 2 – Levitação Supercondutora no LASUP

1.2.3 Levitação Eletromagnética (EML)

A levitação eletromagnética, como pode ser vista na fig. 3, utiliza um princípio físico básico que é o de explorar a força de atração que existe entre o campo magnético produzido por um eletroímã e um material ferromagnético. O EML trata-se do sistema de levitação magnética que não apresenta estabilidade passiva, entretanto, atualmente existem sistemas de controle sofisticados com realimentação em malha

fechada e reguladores devidamente sintonizados capazes de amortizar o problema de instabilidade [3].



Figura 3 – Experiência de Levitação Eletromagnética desenvolvido no LASUP

2 Supercondutividade

Neste capítulo serão apresentados alguns aspectos fundamentais referentes ao fenômeno da supercondutividade. Em um primeiro instante, será apresentado um breve resumo histórico dos fatos experimentais teóricos mais relevantes sobre o desenvolvimento da supercondutividade. Posteriormente, as propriedades eletromagnéticas destes materiais que determinam suas diferentes classes.

2.1 Resumo Histórico

O fenômeno da supercondutividade foi descoberto em 1911 pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes [4], enquanto investigava o comportamento elétrico de metais em baixa temperatura. Sabe-se que a resistividade elétrica de um metal decresce à medida que a temperatura é reduzida. Onnes observou que a resistividade do mercúrio caía abruptamente quando sua temperatura era inferior a uma temperatura crítica T_c de $4,2K$ [5]. Portanto, a esse efeito Onnes atribuiu o nome de supercondutividade. Posteriormente, em 1913 descobriu-se que o chumbo também se tornava supercondutor quando resfriado a uma temperatura inferior a $7,2K$ e, a busca por outros materiais supercondutores continuava à medida que novas descobertas

eram feitas. Heike Kamerlingh Onnes foi laureado com o prêmio Nobel de Física em 1913 por sua investigação das propriedades dos metais sobre baixa temperatura. Um fato interessante e que não deve ser esquecido é que os melhores condutores a temperatura ambiente como, por exemplo: o cobre (Cu), a prata (Ag) e o ouro (Au) não apresentam o estado supercondutor.

Em 1914, Onnes notou que o estado supercondutor, fig. 4, poderia ser “destruído” quando certos parâmetros eram superados, os quais ele designou de críticos. Os parâmetros [6] descobertos pelo físico holandês que destroem o estado supercondutor são:

- Temperatura Crítica (T_c);
- Campo Magnético Crítico (H_c);
- Densidade de Corrente Crítica (J_c).

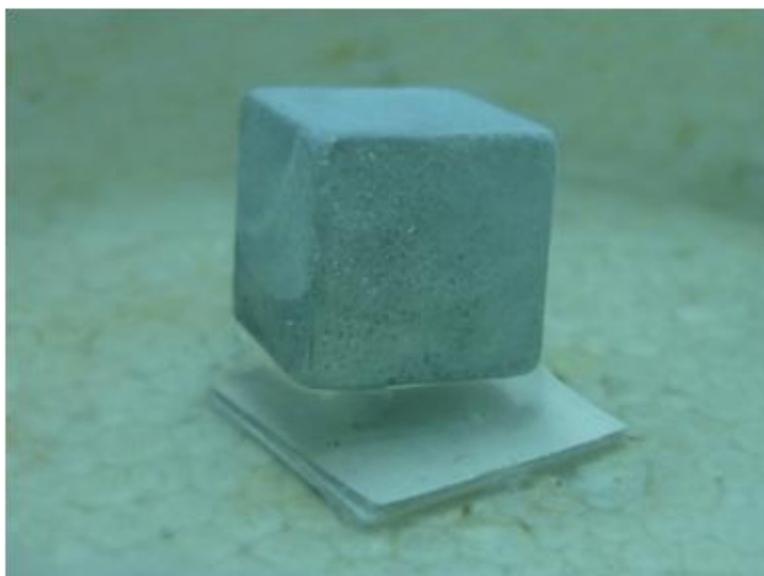


Figura 4 - Ilustração do fenômeno da supercondutividade

Já no ano de 1933, Walter Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram que uma propriedade da supercondutividade é a capacidade de expulsar o campo magnético do interior do material supercondutor. Desse modo, os supercondutores podem ser caracterizados como diamagnetos perfeitos. A esse estado de exclusão total do fluxo magnético deu-se o nome de efeito Meissner que está ilustrado na figura 5. Dada a existência deste conceito, podemos dividir os supercondutores em duas classes: Os supercondutores do tipo I, como pode ser visto na fig. 5, onde existe apenas o efeito Meissner, e os supercondutores do tipo II onde existe um intervalo de

campo magnético em que todo fluxo magnético é expulso do seu interior e outro em que as linhas de fluxo penetram parcialmente no material (estado misto).

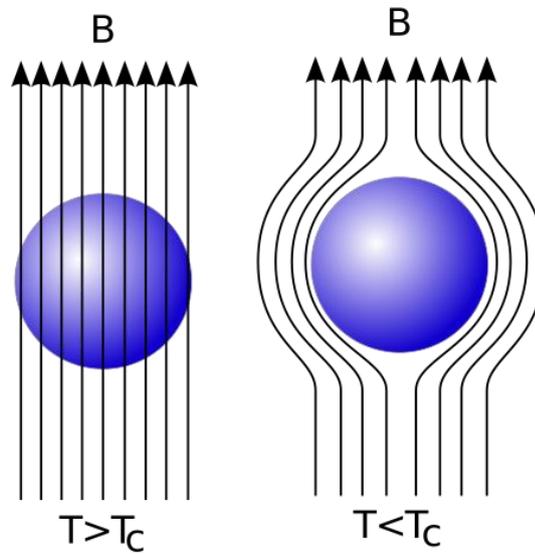


Figura 5 - Comparação do fluxo magnético no interior de um supercondutor tipo I antes e após ser resfriado abaixo de T_c

2.2 Supercondutores do tipo I

Os supercondutores do tipo I, também conhecidos como supercondutores moles (do inglês *soft superconductors*), foram os primeiros a serem descobertos e, em geral, são constituídos de elementos metálicos e algumas ligas metálicas. Estes apresentam uma característica fundamental: uma transição para o estado supercondutor bem abrupta conforme mostra a figura 6 obtida através de um experimento para medir a resistividade nula de uma amostra de Hg - 1212.

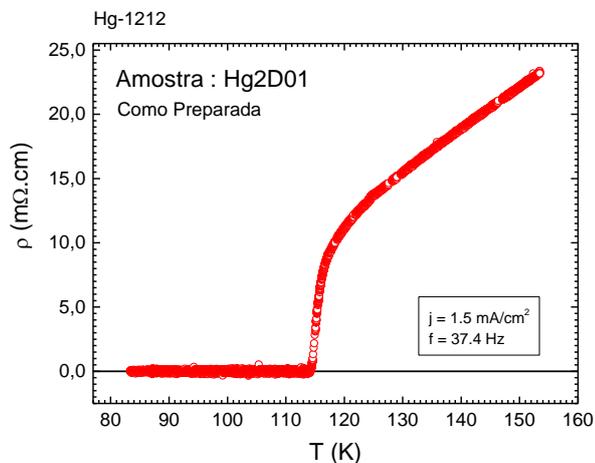


Figura 6 - Transição supercondutora do Hg - 1212

Os supercondutores deste tipo obedecem estritamente ao efeito Meissner [7] até o momento em que um campo magnético superior ao campo crítico H_c começa a penetrar no interior do material supercondutor. Com valores acima de H_c , o material supercondutor retorna para o estado normal de forma repentina. Este tipo de supercondutor não possui nenhum estado intermediário, de modo que as variáveis que determinam o estado do material são a temperatura, o campo magnético aplicado e a densidade de corrente que flui através dele [8].

2.3 Supercondutores do tipo II

Os supercondutores do tipo II, também conhecidos como supercondutores duros (do inglês *hard superconductors*), foram descobertos em torno de 1930. O primeiro composto produzido deste tipo foi o de chumbo bismuto (PbBi). Em geral, os supercondutores deste tipo são formados por ligas metálicas e outros compostos. Sabe-se que os supercondutores do tipo II apresentam características distintas do tipo anterior. Este tipo de supercondutor possui a característica de aprisionar parte do campo magnético em seu interior por meio de vórtices de corrente (*fluxóides*), fig. 7. Vale ressaltar que para ocorrer a penetração do fluxo nos supercondutores do tipo II é necessário que o campo aplicado esteja entre os seus dois valores de campos críticos, H_{c1} e H_{c2} .

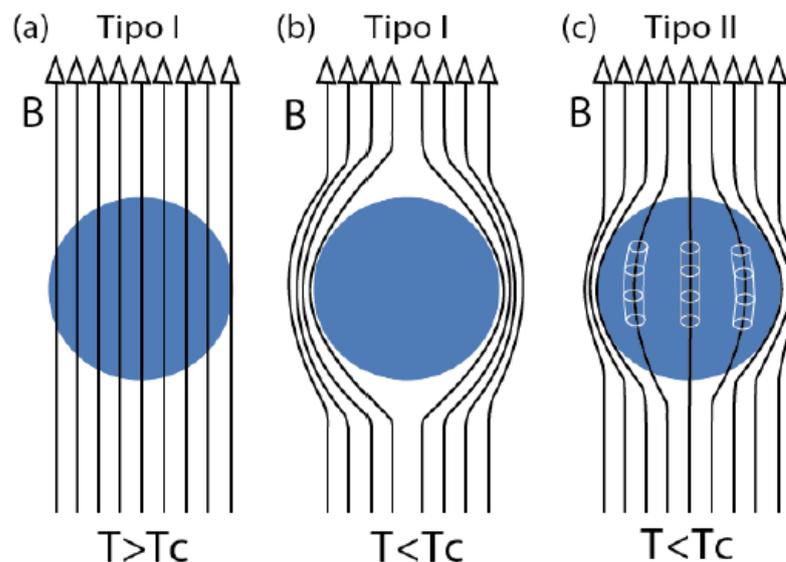


Figura 7 - Fluxo Magnético no interior do supercondutor para uma temperatura T

Logo, os supercondutores do tipo II não apresentam o efeito Meissner Perfeito, ou seja, esses materiais permitem que o fluxo magnético penetre em seu interior. Salvo quando o campo magnético é menor que H_{c1} . Desse modo, suas transições de

estado não são abruptas, pelo contrário são suaves e graduais. Durante a sua transição existem dois estados coexistindo, o normal e o supercondutor. Essa coexistência é denominada como estado Misto. Nesse estado, há no interior da amostra, regiões supercondutoras e regiões normais, em que na última encontram-se regiões distribuídas homoganeamente no material, sendo essas cercadas por regiões supercondutoras. As regiões normais cercadas pelo material supercondutor recebem o nome de *fluxóides* e distribuem-se no condutor formando uma rede triangular ou hexagonal.

É relevante observarmos que os valores dos campos críticos dependem da temperatura. A magnetização do material é máxima em H_{c1} , pois é neste que a amostra suporta sem que haja penetração do fluxo [9]. A magnetização volta a ser nula em H_{c2} , acima do qual a amostra volta ao seu estado normal. Por essa maleabilidade do seu estado, os supercondutores do tipo II são mais utilizados na prática. Além disso, os valores de H_{c1} são tão baixas para os supercondutores do tipo I que os mesmos não possuem aplicações práticas.

2.4 Redes de Abrikosov

Em 2003, Abrikosov foi laureado com o prêmio Nobel por esta descoberta, juntamente com os pesquisadores V.L. Ginzburg e A. J. Leggett pelos seus trabalhos com a super fluidez do He líquido.

Em 1957, Alexei Alexeevich Abrikosov [10] notou a presença de singularidades que chamaram a sua atenção no estado misto do supercondutor do tipo II. A descoberta de Abrikosov demonstrava que, em supercondutores do tipo II, havia penetração de linhas de fluxo magnético e que no centro destas linhas o material se encontrava no estado normal. Quando esta linha encontra-se em uma região defeituosa na rede que estivesse no estado normal, a linha tenderia a permanecer nesta região, porque não necessitaria gastar energia para deixá-lo no estado normal. Essas regiões receberam o nome de fluxóides e ao conjunto dá-se o nome de Rede de Abrikosov, fig. 8 [11].

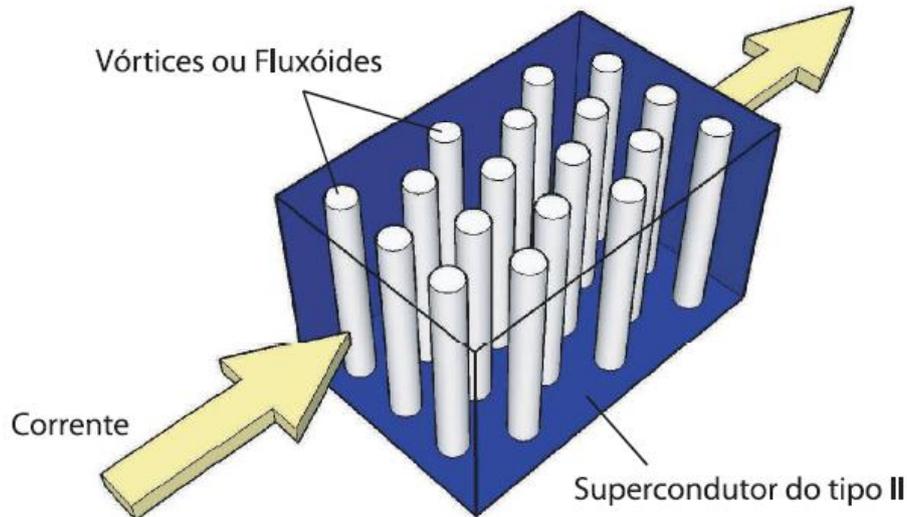


Figura 8 - Rede de Vórtices distribuída homogênea em um supercondutor do tipo II no estado misto

Nota-se que o entendimento destas linhas de fluxo é fundamental para a compreensão da relaxação magnética em supercondutores (*flux creep*). Na presença de uma corrente de transporte, as linhas de fluxo sofrem a ação da chamada força de Lorentz. Devido a esta força, os vórtices tendem a se movimentar na direção transversal à corrente o que induz uma tensão resistiva na direção longitudinal. Para que a corrente flua sem resistência, o movimento das linhas de fluxo deve ser impedido de algum modo. Isto pode ser realizado, uma vez que qualquer não-homogeneidade espacial, como, por exemplo, impurezas na rede cristalina do material tendem a segurar os vórtices se a corrente for suficientemente baixa. A esses lugares de aprisionamento na estrutura do material dá-se o nome de centros de *pinning*.

Destaca-se que na teoria elaborada por Anderson e Kim estudou-se o movimento termicamente ativado dos vórtices na presença dos centros de *pinning*. Logo, nomeou-se a essa teoria como sendo a teoria de *flux creep* que previu a existência de pacotes de linhas de fluxo (*flux bundles*) que se movem independentemente uns dos outros devido à variação local na densidade de *pinning*.

3 Apresentação do Sistema de Medidas e seus Equipamentos

Este capítulo apresenta o sistema de medidas utilizado para a medição da força magnética entre os blocos supercondutores e o trilho de ímãs permanentes. Este sistema foi implementado durante a tese de doutorado de Guilherme Gonçalves Sotelo [12], atual professor de engenharia elétrica pela Universidade Federal Fluminense. Além dos equipamentos utilizados, também serão apresentados os procedimentos de montagem, o seu funcionamento e as ligações realizadas para a utilização do mesmo.

3.1 Equipamentos Utilizados no Sistema

A figura 9 é uma fotografia dos equipamentos envolvidos neste trabalho.

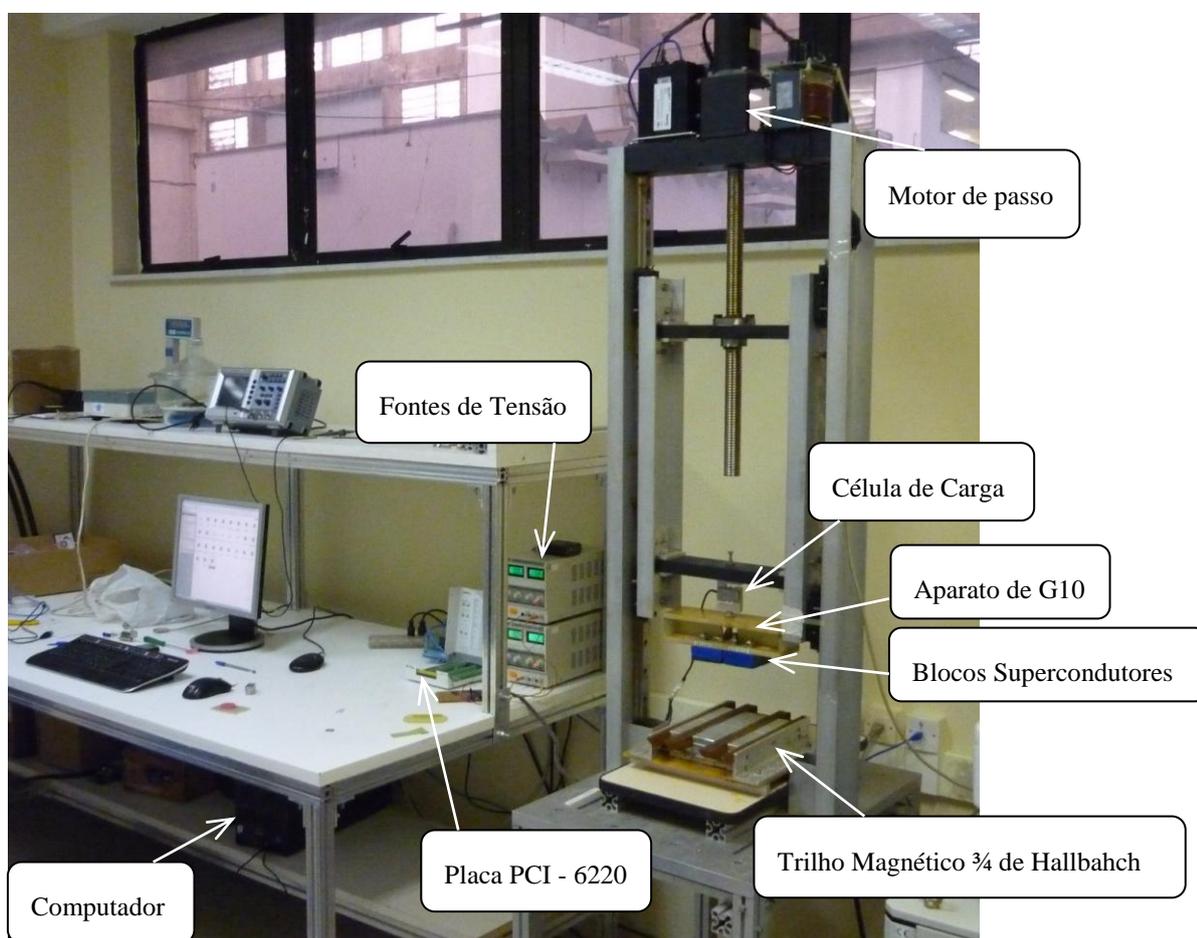


Figura 9 - Vista geral do Sistema de Medidas de Força Magnética (SisMeFoM)

3.1.1 Placa de Aquisição de Dados

O sistema possui uma placa de aquisição de dados da National Instruments PCI-6220 [13], cuja finalidade é gerar tensões de formatos variados utilizando as saídas digitais que são os pulsos de controle do motor e adquirir dados de força

magnética através de sinais de tensão multiplicados por constantes de calibração da célula de carga em uma entrada analógica. Esta placa é controlada em tempo real (real time) através do programa LabView.

A placa ilustrada através da fig. 10 possui 16 canais de entrada analógica, com resolução de 16 bits, taxa de amostragem de 250kS/s e amplitude de entrada com valores de $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 1V$ e $\pm 0,2V$. Ainda possui 24 canais de saída digital com clock de até 1Mhz. Para o funcionamento da placa PCI-6220 ainda são necessários dois componentes: a placa terminal, onde são realizadas as ligações com o sistema de medidas, e o cabo de ligação entre a placa terminal e a placa PCI-6220.

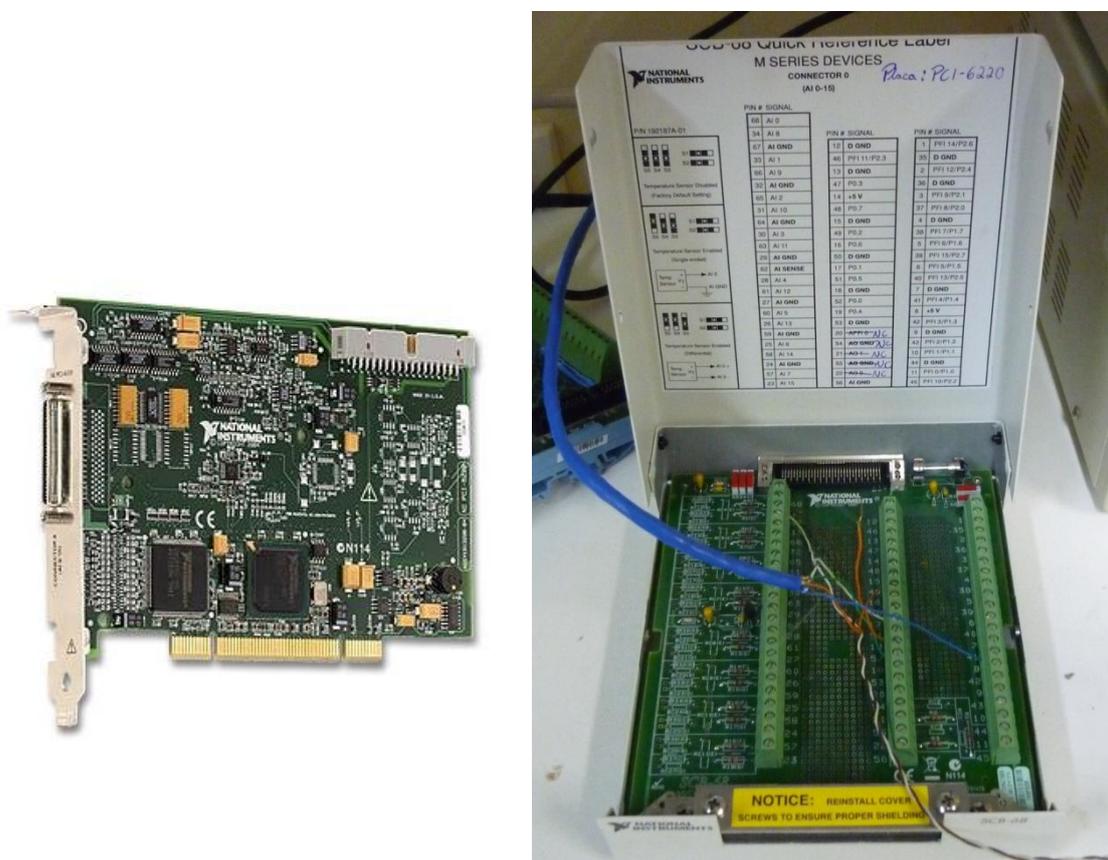


Figura 10 – Foto Ilustrativa da Placa de Aquisição PCI-6220 e placa terminal, respectivamente

3.1.2 Célula de Carga

O sistema de medida possui como peça fundamental ao escopo do trabalho a presença de uma célula de carga, cujas principais funções, em geral, são: balançar

eletrônicas, balanças híbridas eletromecânicas, tanques suspensos a tração, balanças suspensas e esforços de tração que é o principal objetivo de utilização desta peça no Sistema de Medidas de Força magnética, SisMeFoM, como instrumento de medição.

As células, fig. 11, utilizadas no projeto foram fabricadas pela Alfa Instrumentos modelos SV-50 e SV-200, que representam capacidade de tração e compressão de 50 Kg e 200Kg, respectivamente [14].



Figura 11 – Célula de Carga Alfa Instrumentos

3.1.3 Fonte de Tensão

Para realização deste trabalho utilizaram-se duas fontes de tensão independentes e desacopladas. As fontes de tensão, modelo PS-4000 [15] da marca ICEL, podem ser ajustadas continuamente para fornecer tensões entre 0V e 30V. Esta fonte apresenta ainda corrente de saída variável de acordo com a carga, com valores entre 0A e 3A.

As ligações foram efetuadas da seguinte maneira: as duas fontes variante foram ligadas em série, de forma a se obter +12V, -12V. A figura 12 mostra uma foto da fonte de tensão utilizada para alimentar o circuito de amplificação de sinal.



Figura 12 – Foto da fonte de tensão regulada ligada em série ICEL, modelo PS-4000

3.1.4 Motor de Passo

O sistema de medida possui ainda um motor de passo linear, cuja finalidade é movimentar o SisMeFoM verticalmente nas direções ascendentes e descendentes.

Um motor de passo é um tipo de motor elétrico utilizado quando algo deve ser posicionado muito precisamente ou rotacionado de um ângulo exato. Esses motores não usam escovas ou comutadores e possuem número fixo de pólos magnéticos que determinam o número de passos por revolução. Os motores de passo são classificados pelo torque que produzem, e para atingir todo seu torque suas bobinas devem receber corrente máxima durante o passo.

Sabe-se ainda que o controle computadorizado de motores de passo é uma das formas mais versáteis de sistema de posicionamento, particularmente, quando digitalmente controlado como parte de um servo sistema, fig. 13.



Figura 13 – Motor de passo linear

3.1.5 Cola EllsWorth STYCAST 2850FT / Catalyst 23LV

Para realização deste experimento era necessário afixar os blocos supercondutores no bloco polimérico de G10. Primeiramente, uma tentativa de colar o supercondutor e o G10 com uma cola de resina comum foi efetuada. Entretanto, o resultado foi abaixo do esperado e todas as peças soltaram. Com auxílio do então pós-doutorando Daniel Dias atual professor de engenharia elétrica da Universidade Federal Fluminense que observou o tipo de cola que era utilizada em projeto semelhante na Alemanha e o primeiro contato estabelecido pelo graduando Renan Fernandes com o fabricante da cola STYCAST foi possível adquirir esse material colante que mais se adequava ao projeto.

As principais características da cola são a alta resistência a baixas temperaturas, pré-requisito do projeto, se adequar a diversos tipos de materiais, bi-

componente, ou seja, um latão de resina da cola e outro com o catalisador do processo. A seguir, na fig. 14, temos a foto do produto utilizado.



Figura 14 – Imagem Cola Ellsworth STYCAST 2850FT / Catalyst 23LV

3.1.6 Blocos Supercondutores

O LASUP (Laboratório de Aplicação de Supercondutores) possui ainda uma série de blocos supercondutores do tipo II de YBCO (Ítrio-Bário-Cobre), dentre eles existem 9 blocos supercondutores iguais de formato retangular, com largura de 3,2cm, com comprimento de 6,7cm e espessura de 1,4cm da ATZ. Tais blocos foram identificados desde ATZ1 até ATZ9.

As amostras de ATZ1 até ATZ5 são amostras de fabricação mais antiga. Durante a realização dos experimentos, utilizaram-se apenas as amostras de ATZ2 até ATZ5, porque a amostra ATZ1 já apresentava danos a sua superfície de semente. A partir deste momento, as amostras de ATZ2 até ATZ5 passam a constituir o Conjunto 1 de amostras. As amostras de ATZ6 até ATZ9 são amostras mais novas cujo processo de fabricação foi alterado pelo fabricante ATZ. A partir deste momento, as amostras de ATZ6 até ATZ9 passam a constituir o Conjunto 2 de amostras. Analogamente, definem-se os Conjuntos 3 e 4, compostos pelas amostras (ATZ2 e ATZ3) e (ATZ6 e ATZ7), respectivamente. Os Conjuntos 3 e 4 foram utilizados para a realização das medidas do capítulo 4 seção 4.

Então fica claro que compõem os conjuntos as seguintes amostras:

- Conjunto 1: ATZ2 até ATZ5
- Conjunto 2: ATZ6 até ATZ9
- Conjunto 3: ATZ2 e ATZ3
- Conjunto 4: ATZ6 e ATZ7

A seguir, na fig. 15, apresenta-se apenas um bloco supercondutor para exemplificar as amostras supercondutoras utilizadas durante a realização dos experimentos.

A sigla ATZ é devido ao fato dos blocos serem produzidos pela empresa de tecnologia alemã Adelwitz Technologiezentrum GmbH.



Figura 15 – Foto do bloco supercondutor, comparando-o a uma tampa de caneta “BIC”

3.1.7 Trilho Magnético (TM)

Os mancais magnéticos supercondutores baseiam-se na interação entre materiais supercondutores e ímãs permanentes, que é parte magnética do mancal, e é constituída por um trilho magnético(TM). A configuração de TM escolhida deve ser capaz de gerar uma força de levitação que atenda às restrições de projeto e maximizar a estabilidade. A configuração de trilho magnético utilizada no projeto é denominada de $\frac{3}{4}$ de Hallbach (Híbrido). Este TM apresenta direcionamento de fluxo magnético de forma que permita maximizar a força de levitação. Como desvantagem, esta configuração necessita de um aparato mecânico mais sofisticado para montagem do trilho. A seguir, a figura 16 mostra a configuração do TM $\frac{3}{4}$ de Hallbach, e a fig. 17 mostra um protótipo do trilho $\frac{3}{4}$ de Hallbach montado no Lasup.

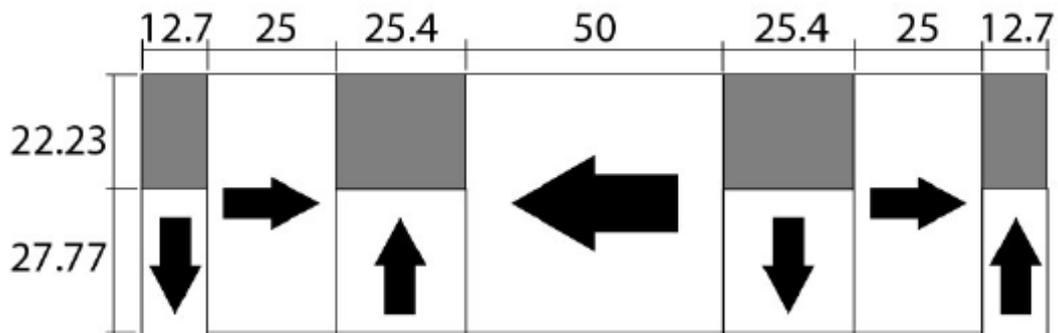


Figura 16 – Configuração do Trilho Magnético ¼ de Hallbach montada e testada no LASUP



Figura 17 – Protótipo do trilho magnético ¼ de Hallbach montado para os ensaios da força de levitação magnética

3.2 Princípios de Funcionamento do Sistema

Para a realização das medidas de força magnética foi utilizado um sistema de medidas capaz de realizar movimentos verticais ao longo do eixo perpendicular ao trilho (eixo z). Este também deverá ser capaz de realizar leituras de força magnética nesta mesma direção, em virtude da interação entre os blocos supercondutores e o trilho magnético. Esta medida será feita através de uma célula de carga bidirecional descrita na seção 3.1.2. A célula de carga utilizada é um instrumento de medida transdutor que realiza medições de forças aplicadas a ela. O seu princípio de funcionamento baseia-se nas Leis de Ohm e de Hooke. Ela possui um conjunto de resistores em seu interior, organizando uma ponte de Wheatstone que recebe o nome de extensômetro. De acordo com o estresse mecânico ao qual o resistor está sujeito ele sofre deformação proporcional à força aplicada e, desse modo, sua resistência é alterada.

Após esta etapa o sinal de tensão proveniente da célula de carga é enviada para um computador por meio de uma placa de aquisição de dados PCI – 6220. O controle e interpretação desses sinais de tensão utilizado neste projeto foi desenvolvido em linguagem de programação LabView pelos graduandos Alan Endalécio e Renan Fernandes. A placa PCI da National Instruments é responsável por adquirir os dados do sensor de força e controlar o motor de passo simultaneamente.

Para o acionamento do motor de passo é utilizado um conversor eletrônico responsável pelo interfaceamento entre os sinais gerados pelo computador e os recebidos pelo motor. Logo, é possível criar uma lógica de pulsos dentro do programa, fig. 18, de sistema de medidas de força magnética desenvolvido para o LabView [16].

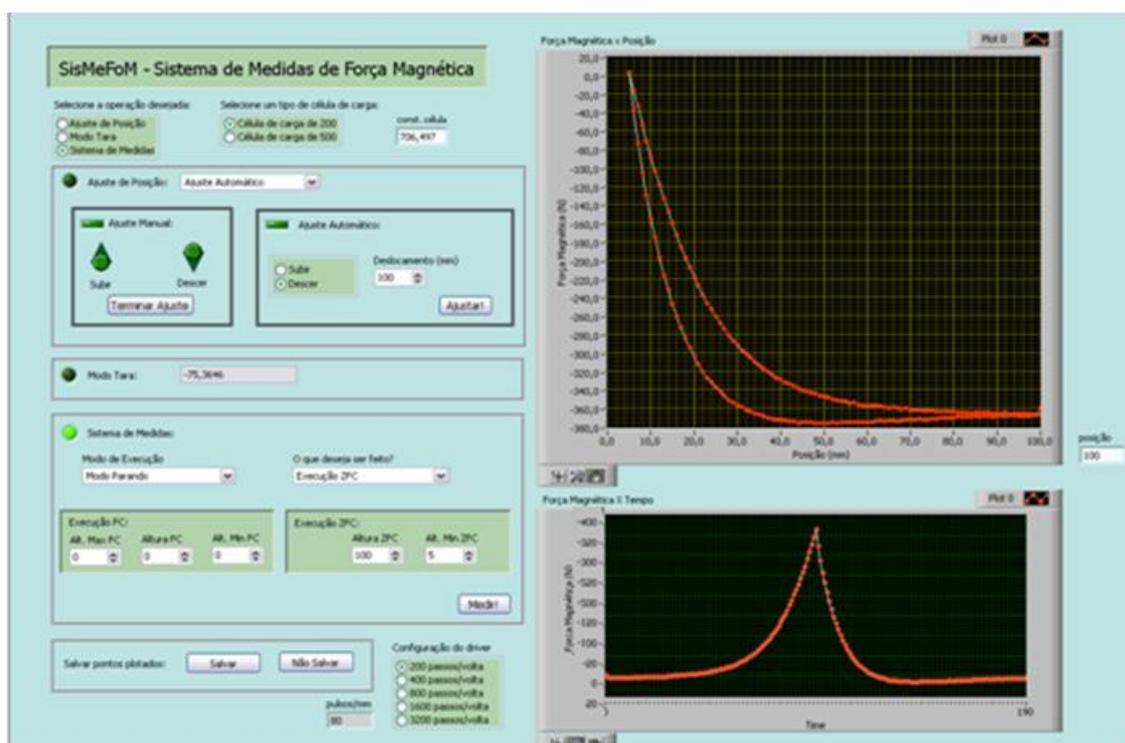


Figura 18 – Programa para o Sistema de Medidas de Força Magnética(SisMeFoM) feito em linguagem LabView utilizado na realização do procedimento experimental

Os sinais de tensão recebidos pelo sensor de força também são adquiridos pelo computador através de um conversor analógico digital (A/D). Como estes sinais são muito baixos eles devem ser amplificados por um circuito externo, antes de passarem pelo conversor e serem amplificados através de uma constante de ganho inserida na programação. Além disso, a programação executa a transformação de sinais de tensão (Volt) em sinais de força (Newton), através de uma constante de proporcionalidade, diferente para cada célula de carga.

Conforme mencionado anteriormente, para a realização das medidas de força magnética, foi utilizado um sistema capaz de realizar movimentos verticais ao longo do eixo z, que consiste basicamente de um atuador linear responsável pelo deslocamento do aparato de G10 onde os blocos supercondutores são afixados. Este atuador é composto por uma guia linear cujo deslocamento é obtido a partir da conversão do movimento de rotação de um motor de passo em movimento de translação através do fuso de uma esfera. O motor de passo foi escolhido para realização desta tarefa devido à facilidade de controle em malha aberta na posição angular do rotor e por ser um dispositivo que se adapta bem à lógica digital.

Nesse sistema, o controle de velocidade do motor de passo é feito por um driver de potência que possui a função de receber sinais de controle e enviá-los às sequências de fases correspondentes para o acionamento do motor de passo.

O aparato experimental mostrou-se satisfatório para a realização de medidas de força de levitação com deslocamentos unidirecionais no espaço, permitindo a medição de força magnética de levitação nos mancais magnéticos supercondutores.

4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de força magnética para os Conjuntos 1 e 2 e o ensaio de afastamento para os Conjuntos 3 e 4.

Como o trabalho visa estudar diferentes topologias de mancais magnéticos supercondutores, isto será feito variando a posição dos blocos supercondutores em relação ao TM e observando o comportamento da força de levitação magnética. Desta forma, pretende-se obter uma configuração ótima de arranjo para os supercondutores. Os arranjos propostos para esse estudo indicam o posicionamento das amostras paralelamente e perpendicularmente ao trilho magnético, em que independente do seu posicionamento as amostras cobrem a mesma área sobre o trilho. O posicionamento perpendicular é aquele em que as amostras supercondutoras estão espacialmente perpendiculares a linha de ferro do TM, enquanto que o posicionamento paralelo é aquele em que as amostras estão espacialmente paralelas a linha de ferro do TM. Para ilustrar o que melhor seriam as posições paralela e perpendicular das amostras em relação ao TM segue a figura 19.

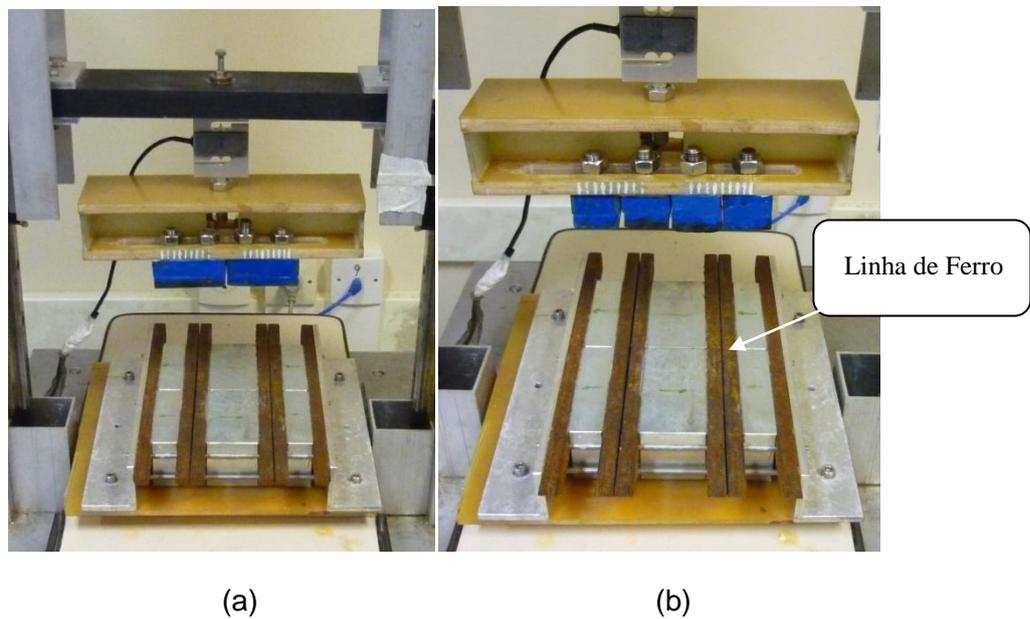


Figura 19 – Posição relativa dos Conjuntos em relação ao TM. (a) Posição perpendicular; (b) Posição paralela

A configuração ótima será aquela que apresentar a maior força magnética entre o TM e os blocos supercondutores. Esses ensaios de força são realizados com o supercondutor resfriado na ausência ou presença de campo magnético. Ou seja, se o supercondutor é 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). Entretanto, se o supercondutor for resfriado próximo ao TM, onde o campo magnético não pode ser desprezado, diz-se que o ensaio foi realizado a *Field Cooling* (FC).

Estes dois ensaios de força conferem características diferentes aos mancais supercondutores. No primeiro caso (ZFC), a força de levitação máxima obtida é maior, entretanto a estabilidade é menor, uma vez que não existe fluxo inicialmente aprisionado no material. Para o segundo caso (FC), apesar da força de levitação ser menor, ocorre um ganho de estabilidade devido ao aprisionamento inicial de fluxo no interior do material. Dessa forma, apesar de ser utilizado o processo de FC para a operação de um veículo Maglev supercondutor, o ZFC também é considerado nas medidas deste projeto [16].

A metodologia do ensaio ZFC para o SisMeFoM ocorre na seguinte ordem: as amostras são posicionadas a 100mm de distância do TM e nitrogênio líquido despejado sobre os supercondutores dentro do aparato de G10. Após os supercondutores atingirem a temperatura de equilíbrio com o nitrogênio líquido e passarem para o estado supercondutor o processo de medição se inicia. Os blocos supercondutores iniciam o movimento a 100mm do TM, descem até 5mm do TM e retornam a posição de 100mm de afastamento do TM. Para o caso de ensaio de FC o procedimento de medição é semelhante, entretanto apresenta algumas particularidades. Primeiramente, as amostras são posicionadas a 30mm, 25mm e 20mm de distância do TM. Em seguida as amostras são resfriadas na temperatura de -196°C e passam ao estado supercondutor e o processo de medição se inicia. Os blocos supercondutores iniciam o movimento a 30mm, 25mm e 20mm do TM, descem até 5mm de distância do TM, sobem até 100mm do TM e retornam a posição de 5mm de distância do TM onde o processo de medição termina e os dados são adquiridos para o computador.

Vale observar que para os dois casos de ensaio, o ZFC e o FC as curvas traçadas de força magnética de levitação por posição do sistema apresentam o caráter histerético de mancais magnéticos supercondutores. Isto acontece quando o campo magnético aplicado em um material ferro magnético, por exemplo, for aumentado até a saturação e em seguida diminuído. A densidade de fluxo magnético não diminui tão rapidamente quanto o campo magnético. Dessa forma quando o campo magnético chega a zero ainda existe uma densidade de fluxo remanescente. Para que o fluxo magnético chegue até zero é necessário aplicar um campo negativo chamado de força coercitiva.

As subseções dos resultados experimentais foram divididas do seguinte modo:

- Conjunto 1
- Conjunto 2
 1. Posição: Paralela
 2. Posição: Perpendicular
 - i. Ensaio de ZFC
 - ii. Ensaio de FC a 30mm
 - iii. Ensaio de FC a 25mm
 - iv. Ensaio de FC a 20mm

4.1 Conjunto1

Nesta seção são encontrados os resultados para os ensaios de ZFC e FC, nas posições paralela e perpendicular ao TM do Conjunto 1.

4.1.1 Posição Relativa ao Trilho: Paralela

Os resultados para o Conjunto 1 na posição paralela demonstram que o ensaio de ZFC apresenta força comparativamente maior ao ensaio de FC, seja qual for a altura de resfriamento do FC em relação ao TM.

As figuras 20, 21, 22 e 23 a seguir referem-se as ensaios de ZFC, FC a 30mm, FC a 25mm e FC a 20mm.

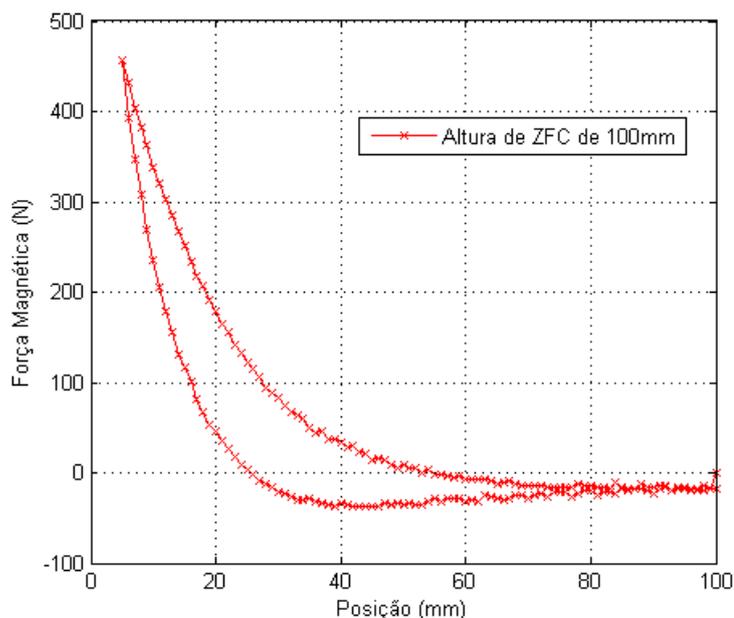


Figura 20 – Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (ZFC) a 100mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

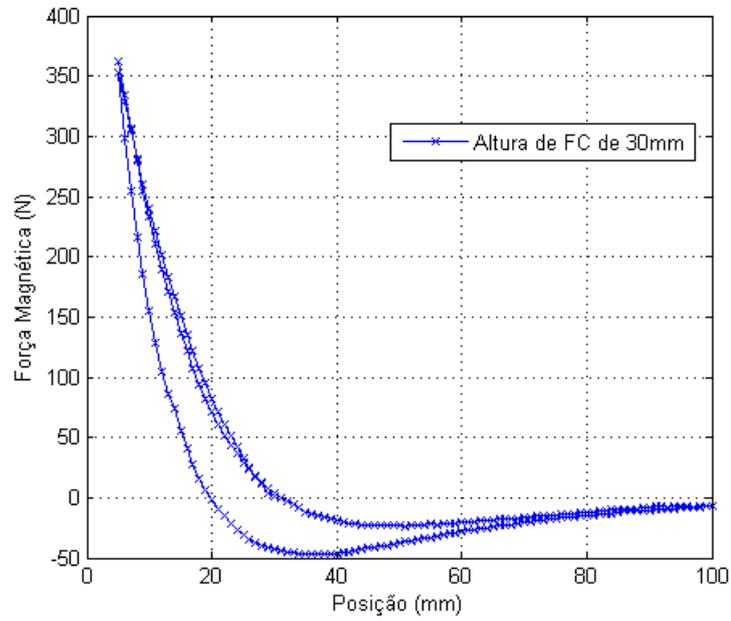


Figura 21 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

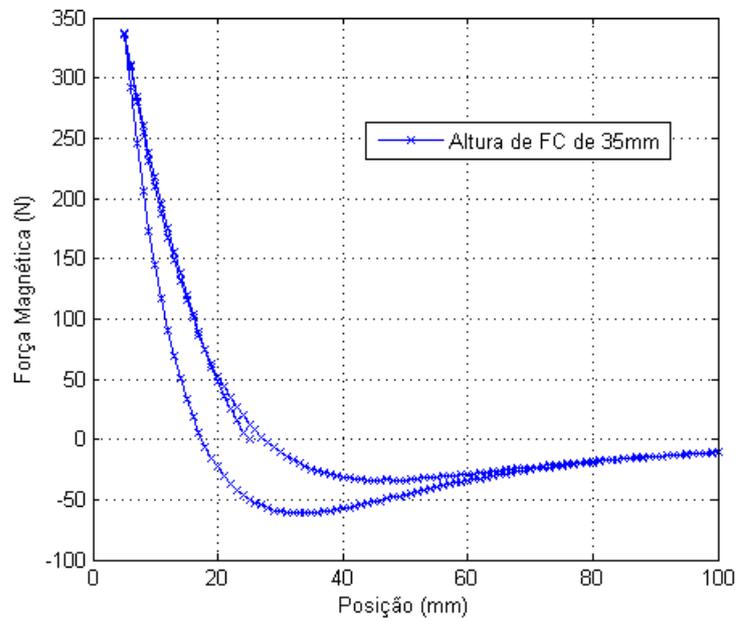


Figura 22 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

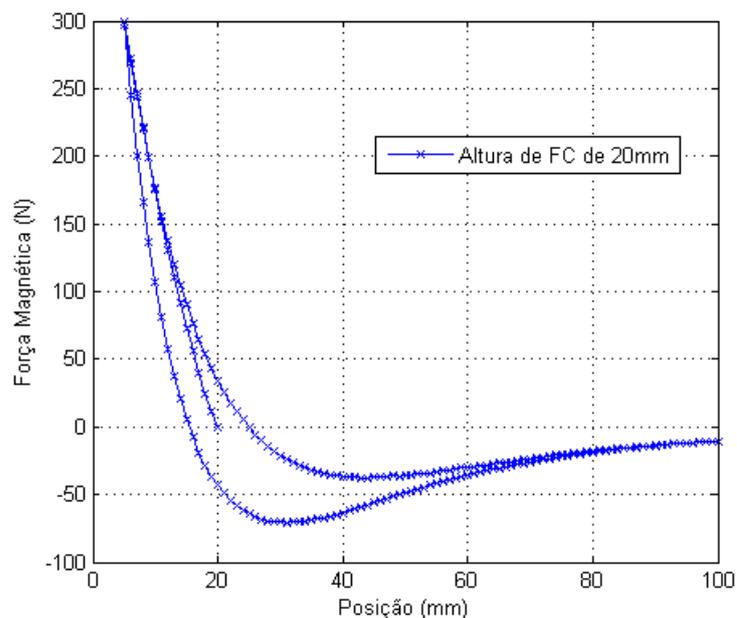


Figura 23 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 1 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

4.1.2 Posição Relativa ao Trilho: Perpendicular

A análise é semelhante a da seção anterior, entretanto as amostras encontram-se perpendicularmente ao trilho nesses ensaios. As figuras 24, 25, 26 e 27 a seguir referem-se as ensaios de ZFC, FC a 30mm, FC a 25mm e FC a 20mm.

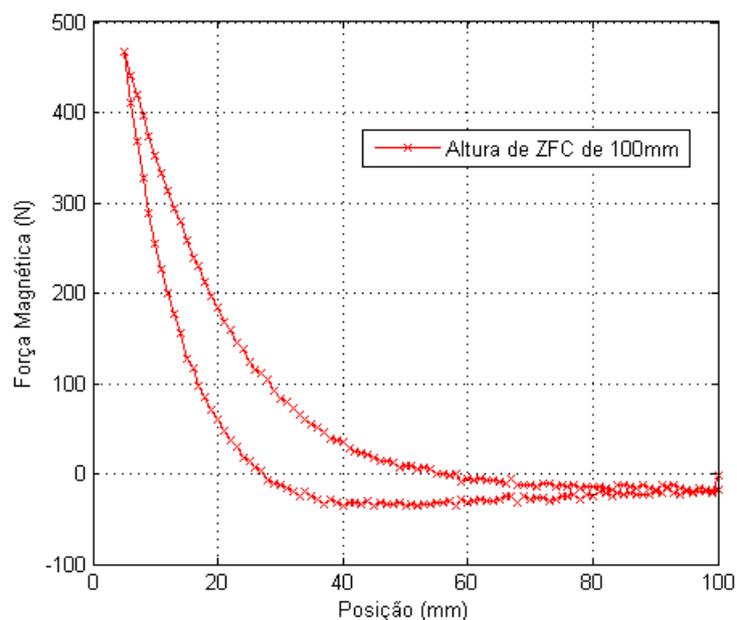


Figura 24 - Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (ZFC) a 100mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

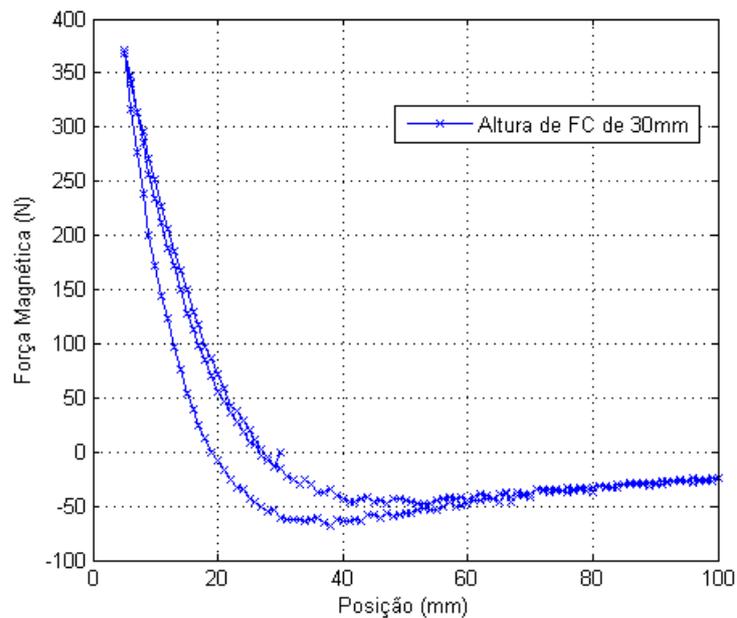


Figura 25 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

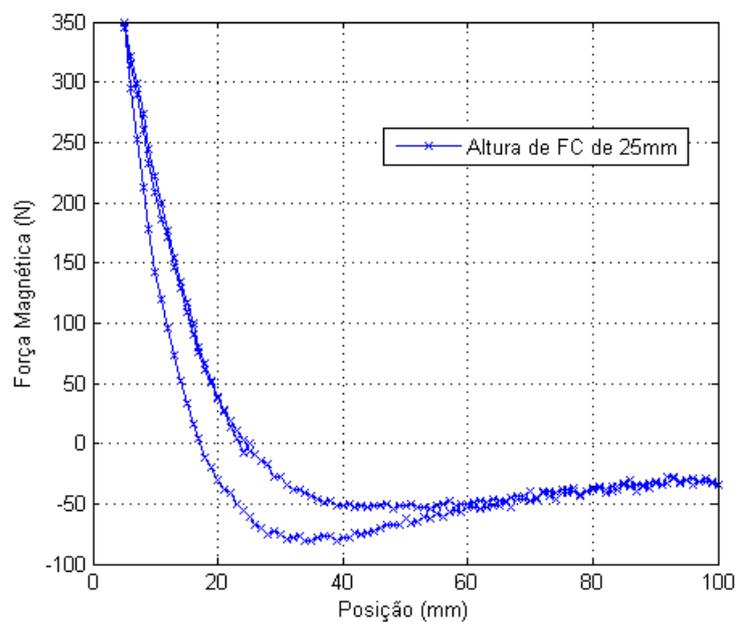


Figura 26 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

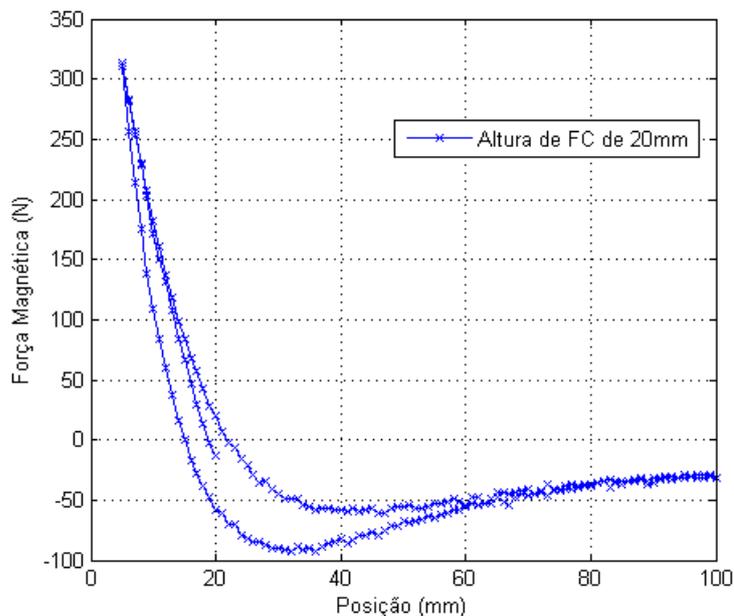


Figura 27 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 1 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

4.2 Conjunto 2

Nessa seção são encontrados os resultados para os ensaios de ZFC e FC, nas posições paralela e perpendicular ao TM do Conjunto 2.

4.2.1 Posição Relativa ao Trilho: Paralela

Os resultados para o Conjunto 2 na posição paralela demonstram que o ensaio de ZFC apresenta força comparativamente maior ao ensaio de FC, seja qual for a altura de resfriamento do FC em relação ao TM.

Vale ressaltar que nos ensaios do Conjunto 2 já podemos observar que a força de levitação magnética mesmo na posição paralela apresenta tendência a ser maior do que o Conjunto 1.

Isto pode ser explicado pelo fato do aprimoramento do processo de fabricação dos blocos supercondutores ATZ6, ATZ7, ATZ8 e ATZ9, Conjunto 2. As figuras 28, 29, 30 e 31 a seguir referem-se aos ensaios de ZFC, FC a 30mm, FC a 25mm e FC a 20mm.

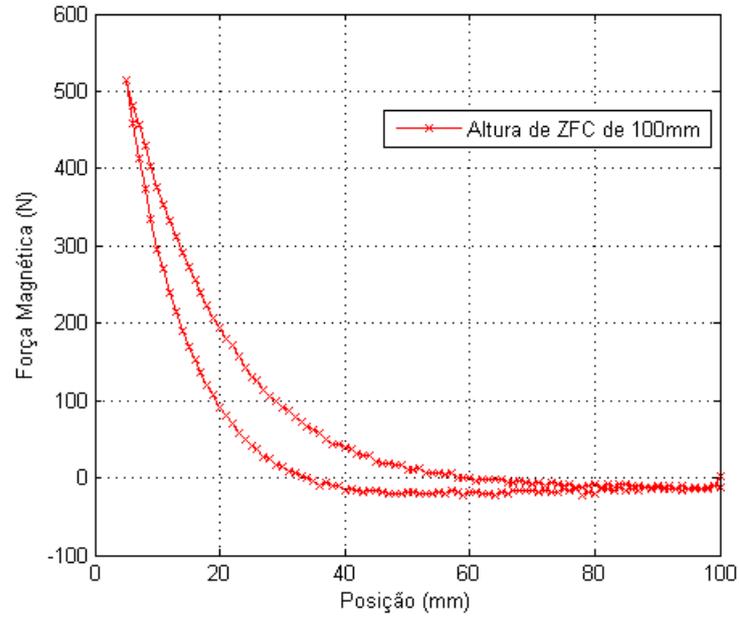


Figura 28 - Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (FC) a 100mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

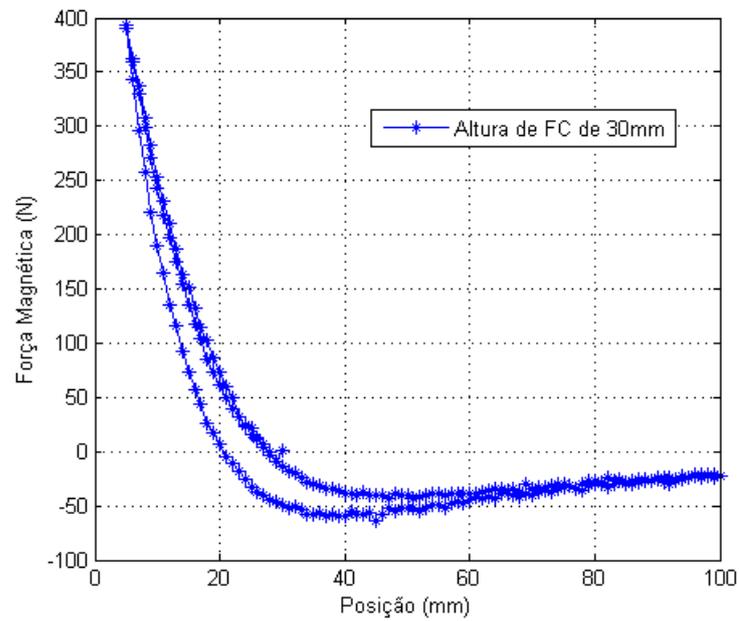


Figura 29 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

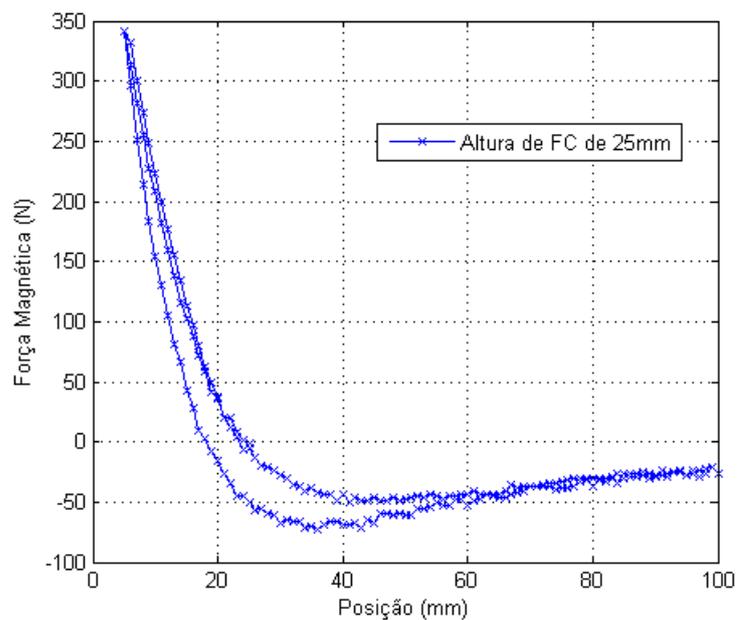


Figura 30 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

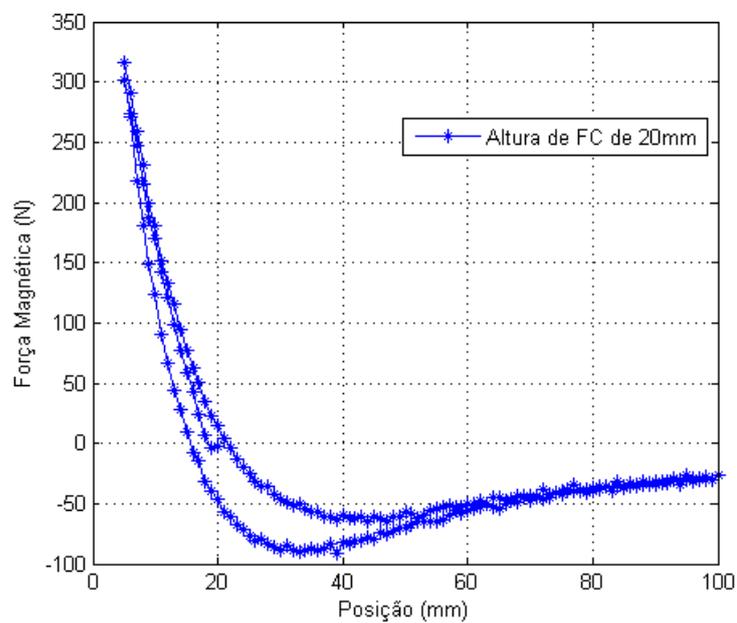


Figura 31 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 2 na posição paralela em relação ao trilho magnético.

4.2.2 Posição Relativa ao Trilho: Perpendicular

A análise é semelhante a da seção anterior, entretanto as amostras encontram-se perpendicularmente ao trilho nesses ensaios. As figuras 32, 33, 34 e 35 a seguir referem-se as ensaios de ZFC, FC a 30mm, FC a 25mm e FC a 20mm.

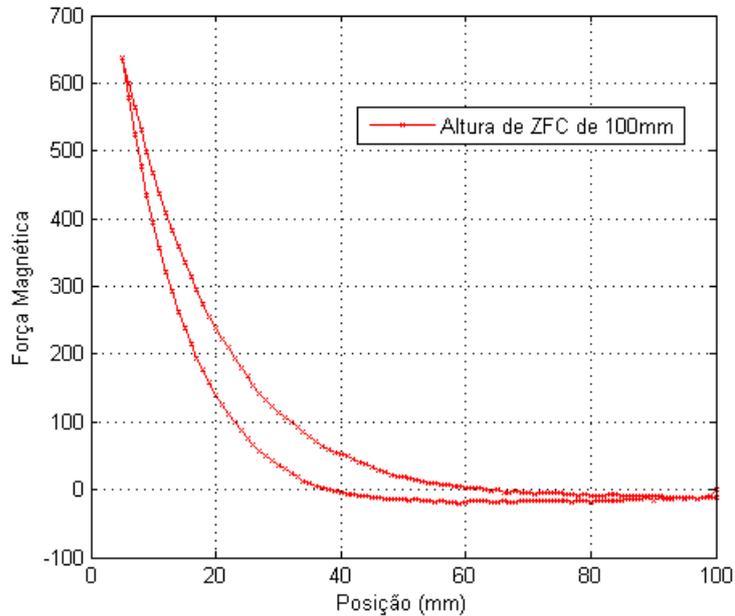


Figura 32 - Resultado para ensaio de Zero Field Cooling (FC) a 100mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

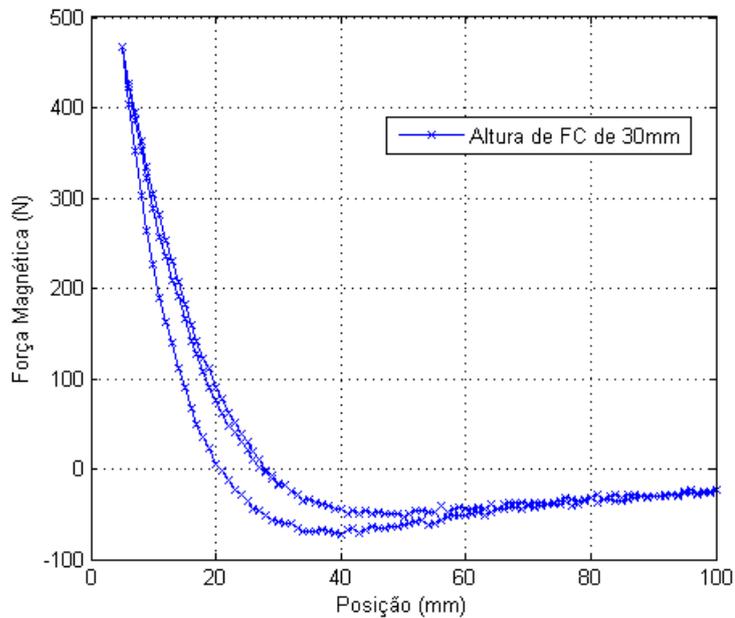


Figura 33 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 30mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

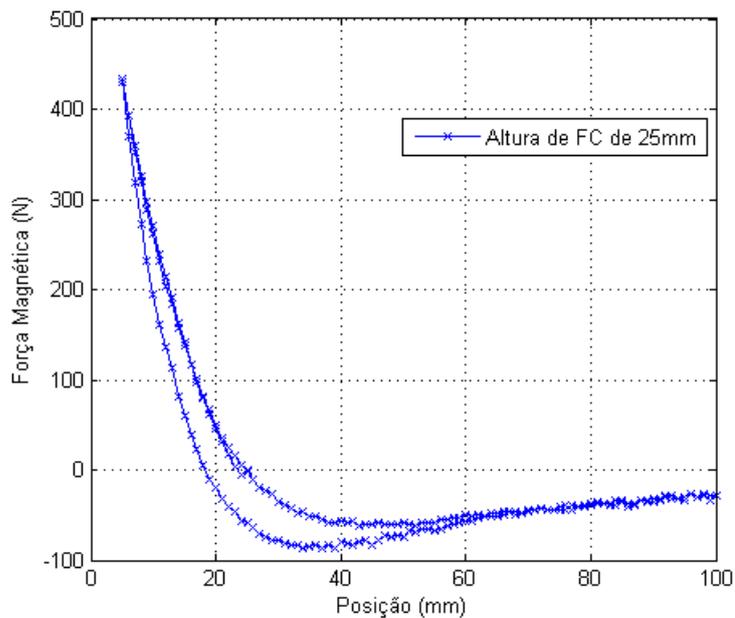


Figura 34 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 25mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

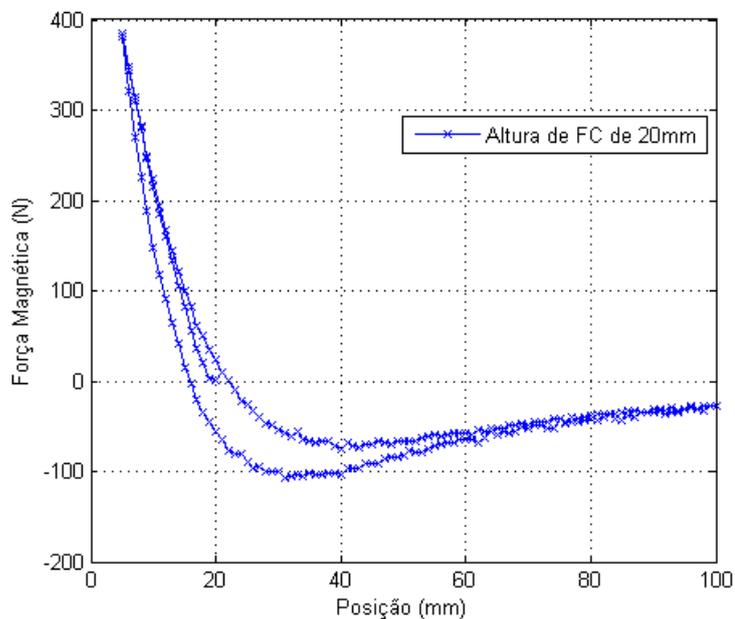


Figura 35 - Resultado para ensaio de Field Cooling (FC) a 20mm para o Conjunto 2 na posição perpendicular em relação ao trilho magnético.

4.3 Resumo das Medidas e Discussão

A tabela 1 contém o resultado das medidas de força magnética de levitação agrupadas juntamente. Através da tabela é simples observar que os ensaios que

obtiveram maior valor de força são os da posição perpendicular, e a maior força absoluta é do Conjunto 2 posicionado perpendicularmente ao TM no ensaio de ZFC. Em geral, o Conjunto 2 obteve melhor resultado em relação ao Conjunto 1 tanto na paralela quanto na perpendicular. Entretanto, observa-se que o ensaio de FC a 25mm na posição perpendicular para o Conjunto 1 apresenta maior força magnética do que o mesmo ensaio(FC a 25mm) para o Conjunto 2 na posição paralela.

Tabela 1 – Tabela comparativa da força de levitação máxima para os ensaios de ZFC e FC, ambos para o Conjunto 1 e Conjunto 2.

Força Magnética de Levitação Máxima (N)				
	Conjunto 1		Conjunto 2	
	Paralelas	Perpendicular	Paralelas	Perpendicular
ZFC	456,7	467,24	513,94	636,61
FC a 30mm	361,91	368,87	392,79	466,93
FC a 25mm	336,91	345,65	341,38	430,39
FC a 20mm	299,68	313,09	315,58	385,67

A tabela 2 apresenta os resultados comparativos percentualmente da tabela 1. Nas duas primeiras colunas da tabela, encontra-se o incremento de força percentual dentro do grupo das amostras, enquanto que nas colunas subsequentes podemos verificar que os valores encontrados referem-se ao cálculo do incremento percentual do Conjunto 1 com relação ao Conjunto 2 nas posições paralela e perpendicular. Vale ressaltar que a diferença entre as posições paralela e perpendicular está explicada no começo do capítulo 4.

Tabela 2 – Tabela comparativa do incremento de força magnética de levitação para os ensaios de ZFC e FC, entre o Conjunto 1 e Conjunto 2.

Incremento de Força* (%)		
	Paralela	Perpendicular
ZFC	12,53	36,25
FC a 30mm	8,53	26,58
FC a 25mm	1,32	24,52
FC a 20mm	5,31	23,19

$$IF^* (\%) = \frac{F \max_{Conjunto2} - F \max_{Conjunto1}}{F \max_{Conjunto1}} \times 100\%$$

Tabela 3 - Tabela comparativa do incremento de força magnética de levitação para os ensaios de ZFC e FC, nas posições paralela e perpendicular.

Incremento de Força* (%)		
	Conjunto 1	Conjunto 2
ZFC	2,31	23,87
FC a 30mm	1,92	18,87
FC a 25mm	2,60	26,07
FC a 20mm	4,47	22,21

$$IF^*(\%) = \frac{F \max_{perpendicular} - F \max_{paralela}}{F \max_{paralela}} \times 100\%$$

Após a análise dos gráficos da seção 4.2 e das tabelas presentes na atual seção podemos afirmar que o Conjunto 2 na posição perpendicular apresenta rendimento e força magnética de levitação bem superior, cerca de 26,58% para o ensaio de FC a 25mm, comparativamente aos outros ensaios de força. Observa-se que o ensaio de ZFC apresenta a maior força de levitação, entretanto sabe-se esse tipo de ensaio não é válido para a montagem do veículo MagLev por não apresentar estabilidade lateral do vagão. Logo, o ensaio de FC a 30mm aponta para resultados significativos para possível implementação em trabalhos futuros sobre MMS.

4.4 Ensaios de Afastamento

A realização dos ensaios de afastamento dos blocos supercondutores advém da necessidade de se comprovar que a máxima força magnética de levitação estará localizada nas regiões 2 e 4 do trilho magnético mostradas a seguir na fig. 36, e isto significa que os blocos supercondutores estarão posicionados da linha de ferro do TM para dentro onde podem ser encontrados as placas centrais de ímã permanente(região 3).

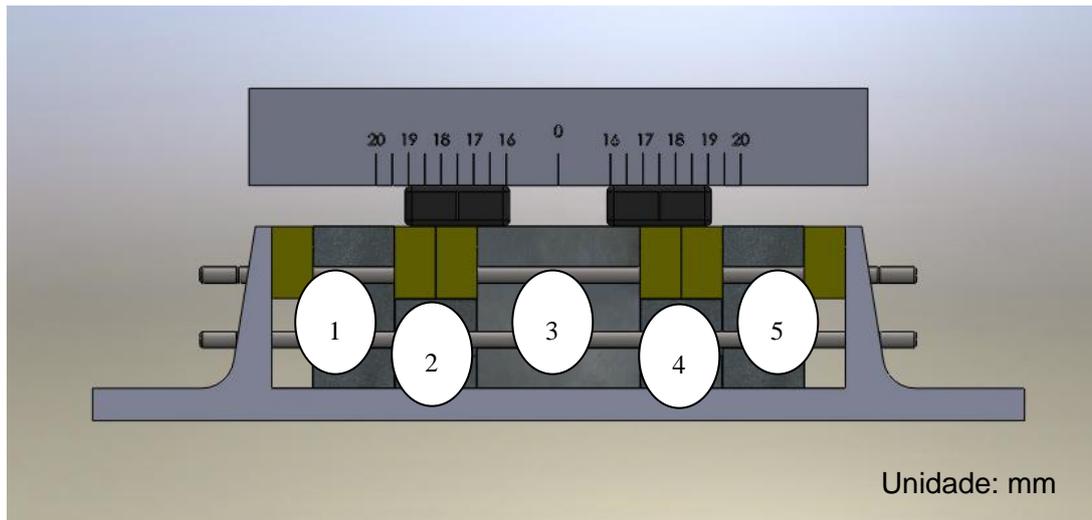


Figura 36 – Ilustração do afastamento de 1,5 cm para a esquerda e para a direita de cada um dos blocos supercondutores.

O procedimento experimental pode ser explicado do seguinte modo: Utilizaram-se 4 blocos supercondutores, sendo 2 pertencentes ao Conjunto 3 e 2 ao Conjunto 4. Posteriormente, centralizaram-se as duas amostras face a face no centro do trilho, portanto elas estariam com seus centros localizados em 16 cm para a esquerda na 1ª amostra e 16 cm para direita na 2ª amostra.

Com os blocos supercondutores fixos nessas posições e paralelos, a linha do TM, foram feitos dois ensaios de FC, o primeiro a 30mm e o segundo a 35mm. Após a primeira rodada de ensaios era necessário deslocar as amostras de 0,5cm para a esquerda e 0,5 cm para direita, respectivamente. Uma vez que elas já estavam fixas na nova posição dois novos ensaios de FC a 30mm e 35mm eram realizados.

Este procedimento foi repetido até um distanciamento de 4 cm da posição da linha de centro do supercondutor na posição final com a posição inicial da linha de centro do supercondutor. Desse modo caracterizamos um distanciamento máximo entre os supercondutores de 40 mm a partir da linha de centro do supercondutor a esquerda para com a linha de centro do supercondutor a direita.

As tabelas e os gráficos com os resultados para os ensaios de FC a 30mm e 35mm com os Conjuntos 3 e 4 encontram-se a seguir.

4.4.1 Conjunto 3: FC a 30mm

Nessa seção são encontrados a tabela e o gráfico referente ao ensaio de FC a 30mm. Ressalta-se que a força máxima foi encontrada quando os supercondutores estavam sobre as regiões 2 e 4, fig. 37.

Tabela 4 – Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 3.

Posição Absoluta das Amostras (mm)	Força Magnética (N)
16	149,69
16,5	192,32
17	205,13
17,5	239,75
18	230,01
18,5	212,48
19	201,16
19,5	166,86
20	152,69

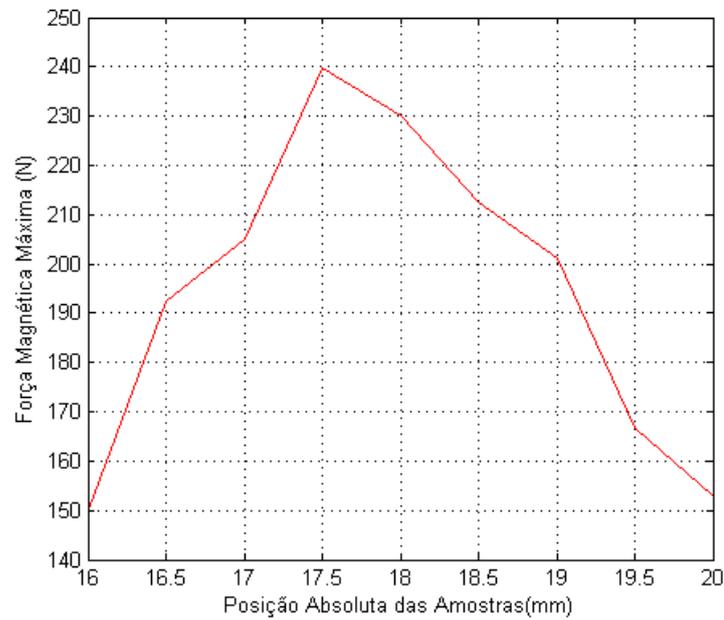


Figura 37 – Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 3.

4.4.2 Conjunto 3: FC a 35mm

Nessa seção são encontrados a tabela e o gráfico referente ao ensaio de FC a 35mm. Ressalta-se que a força máxima foi encontrada quando os supercondutores estavam sobre as regiões 2 e 4, fig. 38.

Tabela 5 - Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 3.

Posição Relativa das Amostras (mm)	Força Magnética (N)
16	162,64
16,5	210,45
17	216,26
17,5	249,21
18	235,61
18,5	220,51
19	210,48
19,5	177,45
20	164,89

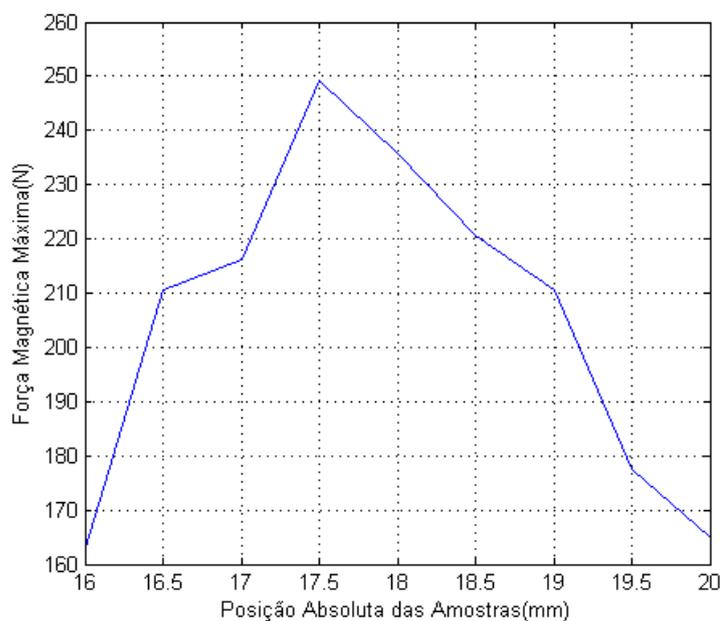


Figura 38 - Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 3.

4.4.3 Conjunto 4: FC a 30mm

Análise semelhante a da seção 4.4.1 pode ser aplicada nesta seção e na seção seguinte, fig. 39 e fig. 40.

Tabela 6 - Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 4.

Posição Relativa das Amostras (mm)	Força Magnética (N)
16	189,43
16,5	230,08
17	247,97
17,5	268
18	261,99
18,5	257,02
19	240,48
19,5	207,96
20	182,49

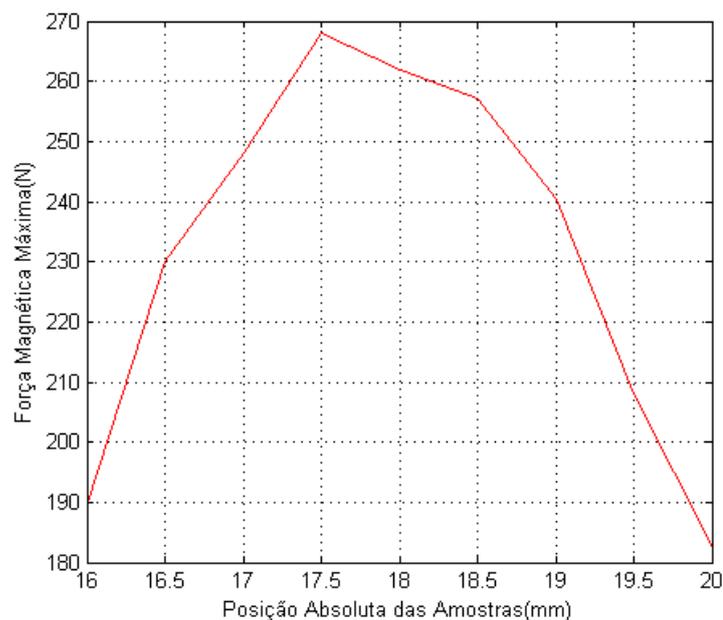


Figura 39 - Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 30mm utilizando o Conjunto 4.

4.4.4 Conjunto 4: FC a 35mm

Tabela 7- Tabela comparativa da força de levitação máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 4.

Posição Relativa das Amostras (mm)	Força Magnética (N)
16	202,68
16,5	243,41
17	272,68
17,5	285,25
18	282,5
18,5	279,88
19	253,98
19,5	214,3
20	189,86

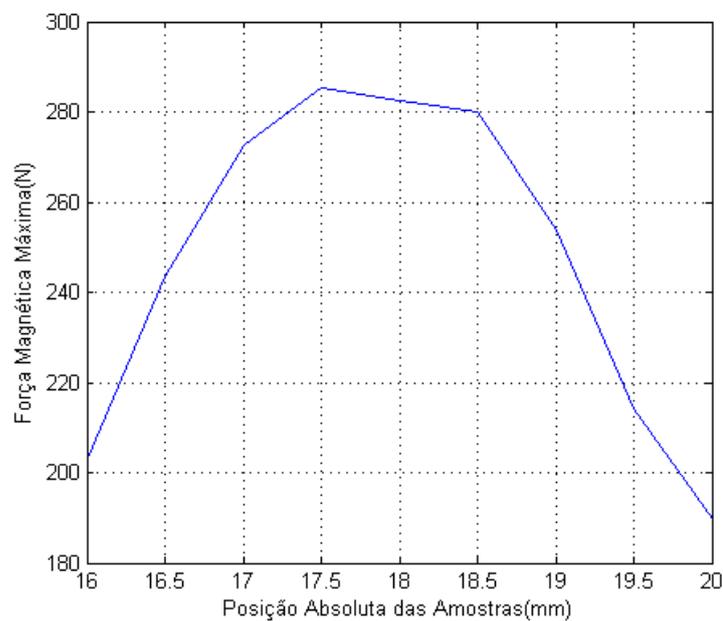


Figura 40 - Força de levitação magnética máxima para o ensaio de FC a 35mm utilizando o Conjunto 4.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou o estudo do comportamento da força de levitação magnética de um mancal magnético supercondutor linear. O MMS é composto por 4 blocos supercondutores e um TM de ímas permanentes cujas características foram apresentadas no capítulo 3 seção 1.7. O estudo da força de levitação magnética ocorreu na direção vertical, mais precisamente sobre o eixo z do plano cartesiano. Para a investigação deste fenômeno utilizou-se o SisMeFoM cujas características estão descritas detalhadamente ao longo do capítulo 3. Os testes foram realizados considerando o resfriamento na ausência (ZFC) e presença (FC) de campo magnético, sendo o último para 3 níveis diferentes de altura de resfriamento.

O estudo da força de levitação magnética máxima e do comportamento da força nos testes de afastamento serão de grande valia para o desenvolvimento dos veículos Maglev's em estudo no LASUP. Os resultados obtidos demonstram que:

- O Conjunto 2 apresenta um incremento no seu processo de fabricação, que se traduz no momento em que os ensaios de FC e ZFC são realizados;
- A geometria que apresentou melhor rendimento, ou seja, que foi capaz de prover a maior força magnética comparativamente foi a perpendicular em relação ao TM;
- Para o teste de afastamento é possível observar que a região do trilho em que as linhas de campo magnético se concentram estão sobre as regiões 2 e 4 apontando para a vizinhança com a região central 3.
- Uma razão pela qual o Conjunto 1 pode não ter apresentado melhor rendimento é pelo fato deles já terem passado por alguns processos de colagem em tentativas anteriores de fixação dos blocos supercondutores à peça de G10. Durante a colagem para a realização deste experimento a amostra ATZ1, principalmente, apresentou elevado dano a sua superfície.
- Todos os ensaios são de extrema importância para o estudo e confecção dos criostatos utilizados no Maglev Cobra.

Como proposta de trabalho futuro sugere-se a investigação mais precisa do estudo da força de levitação magnética em mancais magnéticos supercondutores, e o seu aproveitamento nos veículos de levitação magnética propriamente.

6 Referências Bibliográficas

[1] Wikipedia. JR-Maglev. Wikipedia, a enciclopédia livre, 2010. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Maglev#Levita>>. Acesso em 22 de outubro de 2011.

[2] Maglev Cobra; Disponível em <<http://www.dee.ufrj.br/lasup/maglev/>>. Acesso em 22 de Outubro de 2011.

[3] Valle, R. L. S. (2010). Levitação Eletromagnética de um Disco. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ.

[4] H. Kamerling Onnes, “The Superconductivity of Mercury”, Comm. Phys. Lab., University Leiden (1911).

[5] Ostermann, F., Pureur, P.; Supercondutividade: Temas Atuais de Física. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

[6] A.C. Rose Innes, E.H. Rhoderick, Instruction to Superconductivity, 2ª ed., Oxford, Pergamon Press (1978).

[7] Dias, D. H. N., (2009). Modelagem de Mancais Lineares Supercondutores Considerando o Resfriamento na Presença de Campo Magnético. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE - UFRJ.

[8] Dias, D. H. N., (2010). Comportamento da força de levitação em mancais lineares frente a oscilações do supercondutor. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ.

[9] Vieira, K. B., (2008). Aprisionamento dos Vórtices de Abrikosov no MgB_2 através da adição de Nanopartículas de Ni. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNICAMP.

[10] Abrikosov, A. A. Fundamentals of the theory of metals, amsterdam: North-Holland, 1988.

[11] Silva, F. R., (2010). Efeito da Relaxação de Fluxo Magnético na Força de Levitação em Mancais Supercondutores. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ.

[12] Sotelo, G. G., (2007). Modelagem de Supercondutores em Mancais Magnéticos. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE - UFRJ.

[13] Placa PCI – 6220, National Instruments; Disponível em <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14130>>. Acesso em 23 de Outubro de 2011.

[14] Alfa Instrumentos; Disponível em <<http://www.alfainstrumentos.com.br>>. Acesso em 22 de Outubro de 2011.

[15] ICEL MANAUS; Manual de Instruções da Fonte de Alimentação 30V / 3A modelo PS-4000. Disponível em <<http://www.icel-manaus.com.br/manual/PS-4000%20New%20Manual.pdf>>. Acesso em 22 de outubro de 2011.

[16] Dias, D. H .N., Endalécio, A. D. M., Fernandes, R. P., Machado, O. J., Martins, F. G. R., Sotelo, G. G., Junior, R. A., (2010); Implementação de um Sistema de Medidas de Força e Torque para Mancais Magnéticos Supercondutores Lineares. Congresso Brasileiro de Automático (CBA), Bonito – MS.

7 Anexos

7.1 Technical Data Sheet STYCAST 2850FT / Catalyst 23LV

Technical Data Sheet



STYCAST™ 2850FT™/Catalyst 23LV™

June 2009

PRODUCT DESCRIPTION

STYCAST™ 2850FT™/Catalyst 23LV™ provides the following product characteristics:

Technology	Epoxy
Appearance (Resin)	Black
Components	Two component - requires mixing
Mix Ratio, by weight - Resin : Hardener	100 : 7.5
Mix Ratio, by volume - Base : Hardener	100 : 17.5
Product Benefits	<ul style="list-style-type: none"> Thermally conductive Low CTE Electrically Insulating High strength Long pot life Low color Low viscosity Excellent thermal shock resistance
Cure	Room temperature cure
Application	Encapsulant
Operating Temperature	-65 to 105 °C
Surfaces	Glass

STYCAST™ 2850FT™/Catalyst 23LV™ is recommended for encapsulation of components that require heat dissipation and thermal shock properties.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Part A Properties 2850FT™

Viscosity, Brookfield, 25 °C, mPa·s (cP)	200,000 to 250,000
Speed 5 rpm, #7	
Specific Gravity	2.35 to 2.45
Shelf Life @ 25°C, months	12
Flash Point - See MSDS	

Part B Properties Catalyst 23LV™

Viscosity @ 25 °C, mPa·s (cP)	20 to 30
Flash Point - See MSDS	

Mixed Properties

Mixed Viscosity, mPa·s (cP)	5,600
Specific Gravity	2.19
Working Time, 100 g mass, @ 25°C, minutes	60
Flash Point - See MSDS	

TYPICAL CURING PERFORMANCE

Cure Schedule

16 to 24 hours @ 25°C or
4 to 8 hours @ 45°C or
2 to 4 minutes @ 65°C

Post Cure

Post Cure: 2 to 4 hours at the highest expected use temperature

The above cure profiles are guideline recommendations. Cure conditions (time and temperature) may vary based on customers' experience and their application requirements, as well as customer curing equipment, oven loading and actual oven temperatures.

TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Physical Properties:

Coefficient of Thermal Expansion, ASTM D 3386:	
Below Tg, ppm/°C	39.4
Above Tg, ppm/°C	111.5
Glass Transition Temperature, ISO 11357-2, °C	68
Thermal Conductivity, W/mk	1.1
Shore Hardness, ISO 868, Durometer D	92
Water Absorption, ISO 6224 hours, %	0.02
Linear Shrinkage, cm/cm	0.003
Compressive Strength, psi	17,400
Flexural strength, ASTM D790	N/mm ² 106 (psi) (15,300)

Electrical Properties:

Volume Resistivity, IEC 60093, Ω·cm	>1×10 ¹⁵
Dielectric Constant / Dissipation Factor, IEC 60250:	
1mHz	5.36 / 0.051
Dielectric Breakdown Strength, IEC 60243-1, kV/mm	14.8

GENERAL INFORMATION

For safe handling information on this product, consult the Material Safety Data Sheet, (MSDS).



DIRECTIONS FOR USE

1. Complete cleaning of the substrates should be performed to remove contamination such as oxide layers, dust, moisture, salt and oils which can cause poor adhesion or corrosion in a bonded part.
2. Some separation of components is common during shipping and storage. For this reason, it is recommended that the contents of the shipping container be thoroughly mixed prior to use.
3. Accurately weigh resin and hardener into a clean container in the recommended ratio.
4. Blend components by hand, using a kneading motion, for 2 to 3 minutes and scrape the bottom and sides of the mixing container frequently to produce a uniform mixture.
5. If possible, power mix for an additional 2 to 3 minutes.
Avoid high mixing speeds which could entrap excessive amounts of air or cause overheating of the mixture resulting in reduced working life.
6. To ensure a void-free embedment, vacuum deairing should be used to remove any entrapped air introduced during the mixing operation.
7. Vacuum deair mixture at 1 to 5 mm mercury. The foam will rise several times the liquid height and then subside.
8. Continue vacuum deairing until most of the bubbling has ceased. This usually takes 3 to 10 minutes.
9. To facilitate deairing in difficult to deair materials, add a few drops of an air release agent, such as ANTIFOAM 88 into 100 grams of mixture.
10. Gentle warming will also help, but pot life will be shortened.
11. Pour mixture into cavity or mold.
12. Gentle warming of the mold or assembly reduces the viscosity. This improves the flow of the material into the unit having intricate shapes or tightly packed coils or components.
13. Further vacuum deairing in the mold may be required for critical applications.

Storage

Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may be indicated on the product container labeling.

Optimal Storage: 25 °C

Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel Corporation cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Not for product specifications

The technical data contained herein are intended as reference only. Please contact your local quality department for assistance and recommendations on specifications for this product.

Conversions

$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$
 $\text{KV/mm} \times 25.4 = \text{V/mil}$
 $\text{mm} / 25.4 = \text{inches}$
 $\text{N} \times 0.225 = \text{lb}$
 $\text{N/mm} \times 5.71 = \text{lb/in}$
 $\text{N/mm}^2 \times 145 = \text{psi}$
 $\text{MPa} \times 145 = \text{psi}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 8.851 = \text{lb}\cdot\text{in}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 0.738 = \text{lb}\cdot\text{ft}$
 $\text{N}\cdot\text{mm} \times 0.142 = \text{oz}\cdot\text{in}$
 $\text{mPa}\cdot\text{s} = \text{cP}$

Note

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Reference 0.2

7.2 Permissão para utilização da figura 1

Dear Mr. Leonardo Luiz de S. Santos,

Thank you for your polite mail about permission to use the image of MAGLEV.

I "was" manager of international affairs section of RTRI until this April.

Now I am laboratory head of a laboratory as below.

Our PR section will not permit the official use of the image for an individual personnel.

In my experience, some kinds of public organizations, such like IEEE, IEC... were the exception.

I hope you will write an excellent graduation report. So that, I will inform you that there are some free usage images about MAGLEV.

For example:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/JR-Maglev>

And if you still want to get the official permission from RTRI, please write to me again. Then I will introduce you to the new manager.

Best regards,

--

Tetsuo UZUKA,

Laboratory head, Power supply laboratory
Railway Technical Research Institute (RTRI)
Tel: +81-42-573-7334,

Fax -81-42-573-7439
e-mail: uzuka@rtri.or.jp

7.3 Configuração da Revolução do Motor de Passo

		MD808		MD808-128	
Switch*	Position*	Resolution	Pulses/Ref	Resolution	Pulses/Ref
All	Up	Full	200	Full	200
7	Down	1/2	400	1/2	400
8	Down	1/5	1,000	1/4	800
7 & 8	Down	1/10	2,000	1/8	1,600
6	Down	1/20	4,000	1/16	3,200
6 & 7	Down	1/25	5,000	1/32	6,400
6 & 8	Down	1/50	10,000	1/64	12,800
6, 7, & 8	Down	1/100	20,000	1/128	25,600