

EFEITO DA RELAXAÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO NA FORÇA DE LEVITAÇÃO EM MANCAIS SUPERCONDUTORES

Felipe Ribeiro da Silva

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

(Orientador)

Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias

(Co-orientador)

Prof. Richard Magdalena Stephan

Prof. Sergio Sami Hazan

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2010

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela minha existência e por todas as benções e graças que Ele me proporciona, à minha mãe, Lina Maria Ribeiro da Silva, ao meu pai, Osmar Coutinho da Silva, a minha irmã Rita de Cássia e a toda minha família pela educação a mim ministrada por meio de força e apoio em todos os momentos da minha vida e incentivo na continuidade dos meus estudos.

Aos meus familiares (*in memorian*) que sempre se orgulharam de mim pela minha dedicação e perseverança que tive a fim de alcançar meus objetivos. Aos meus amigos, que por muitas vezes não entenderam o porquê do meu esforço demasiado durante o período da faculdade.

Gostaria de agradecer a todos os professores que participaram da minha formação profissional e aos meus orientadores Rubens de Andrade Jr. e Guilherme Gonçalves Sotelo pelo respeito e ensinamentos conquistados e pela total confiança a mim depositado no desenvolvimento do trabalho realizado durante o percurso da faculdade. Agradeço especialmente a Daniel Henrique Nogueira Dias pelo apoio e auxílio necessário durante o projeto sem o qual, certamente, não conseguiria finalizar este trabalho.

Resumo

Este trabalho consiste em investigar o comportamento da força de levitação magnética com o tempo, em mancais lineares supercondutores, considerando o resfriamento na presença (*field cooling - FC*) e ausência (zero *field cooling - ZFC*) de campo magnético. Devido à propriedade de relaxação do fluxo magnético (*flux creep*) dos materiais supercondutores, em especial, do tipo II, a força de levitação apresenta um decaimento em função do tempo. As medidas de força realizadas neste trabalho comprovam que este decaimento apresenta um comportamento logarítmico. Dessa forma, a partir de uma projeção deste comportamento ao longo do tempo, é possível determinar qual a variação da força de levitação após um determinado período. Este estudo é de extrema importância para o projeto de equipamentos que envolva tecnologia de mancais supercondutores, como por exemplo, o veículo de levitação magnética *Maglev -Cobra*.

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 deverá também ser capaz de realizar as leituras de força magnética nesta mesma direção, em virtude da interação entre o criostato e o trilho magnético. Esta medida será realizada por meio de uma célula de carga bidirecional, que faz então a medida dessa resistência através da medição da tensão e da corrente presente em tal resistor. A tensão é então enviada para um computador por meio de uma placa de aquisição de dados (conversor A/D). O controle responsável pela movimentação do sistema e aquisição dos valores de força magnética foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação em diagramas de blocos do *Matlab (Simulink)*.

As medidas realizadas durante o trabalho permitem fazer uma análise comparativa entre a variação da força de levitação nos mancais supercondutores sujeitos a diferentes velocidades de aproximação e topologias, comprovando o caráter termodinâmico (*flux creep*) no qual a força magnética estará submetida.

Índice

Índice	iv
Capítulo I - Introdução.....	1
1.1. Tipos de Levitação Magnética	2
1.1.1. Levitação Eletrodinâmica (EDL)	2
1.1.2. Levitação Eletromagnética (EML).....	3
1.1.3. Levitação Supercondutora (SML).....	4
Capítulo II - A supercondutividade.....	4
2.1. Introdução histórica.....	4
2.2. Supercondutores tipo I	7
2.3. Supercondutores tipo II	8
2.4. Redes de Abrikosov	9
2.5. Aplicações da Supercondutividade	10
2.6. Veículo Maglev-Cobra.....	12
Capítulo III - Efeito flux creep	14
3.1. Fatores relevantes ao aprisionamento de fluxo	14
3.2. Modelo Anderson-Kim	16
Capítulo IV - Mancais magnéticos supercondutores	18
Capítulo V - Sistema de medidas de força.....	23
5.1. Acionamento do sistema	23
Capítulo VI - Interação entre o criostato e os mancais supercondutores.....	27
6.1. Resultados e ensaios em ZFC	28
6.2. Resultados e ensaios em FC.....	30
6.2.1. Medidas realizadas com o trilho Concentrador de Fluxo.....	30
6.2.2. Medidas realizadas com o trilho $\frac{3}{4}$ de Hallbach	37
6.3. Medidas de flutuação da força de levitação magnética.....	40

Capítulo VII - Conclusões e trabalhos futuros	42
Capítulo VIII - Referências.....	44

Índice de Figuras

Figura 1: Exemplo de trem MAGLEV com a tecnologia EDL: (a) Sistema de levitação (b) Sistema de tração.....	3
Figura 2: Representação esquemática de um veículo de levitação eletromagnética (EML).	3
Figura 3: Ilustração do fenômeno da supercondutividade.....	5
Figura 4: Fluxo magnético no interior de um supercondutor do tipo I para (a) $T > T_c$ e (b) $T < T_c$	6
Figura 5: Configuração do fluxo magnético no interior de um supercondutor para uma temperatura T (a) acima de T_c e (b) abaixo de H_{c1} (Efeito Meissner) e (c) entre H_{c1} e H_{c2} (estado misto).....	8
Figura 6: Disposição da estrutura dos tubos de fluxo no supercondutor do tipo II na presença de um campo externo aplicado com magnitude entre H_{c1} e H_{c2}	10
Figura 7: Protótipo em escala real do veículo supercondutor. A figura a direita mostra com detalhes um dos criostatos sobre o trilho magnético.....	13
Figura 8: Mancal linear com o trilho magnético: (a) $\frac{3}{4}$ de Hallbach e (b) Concentrador de Fluxo.....	18
Figura 9: Detalhes do criostato utilizado. (a) Posicionamento e dimensões das amostras de YBaCuO (YBCO); (b) Esquema do criostato utilizado.....	19
Figura 10: (a) Peça em alumínio fundido para montagem de uma célula do trilho magnético e (b) Seção transversal do trilho magnético com a configuração Concentrador de fluxo.	20
Figura 11: Configuração do trilho $\frac{3}{4}$ de Hallbach montada e testada no LASUP.....	21
Figura 12: Protótipo do trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach montado para os ensaios da força de levitação magnética.....	21
Figura 13: Componente z da densidade de fluxo magnético medida, configuração: Concentrador de Fluxo.....	22
Figura 14: Componente z da densidade de fluxo magnético medida, configuração: $\frac{3}{4}$ de Hallbach.....	22

Figura 15: Célula de carga utilizada no sistema de medidas.....	23
Figura 16: Sistema de medidas da força de levitação magnética	24
Figura 17: Placa de aquisição de dados Advantech 1711.....	25
Figura 18: Arquivo do Simulink para a realização da medida de força de levitação em mancais supercondutores	25
Figura 19: Célula de carga, trilho e criostato preparados para as medidas de força de levitação magnética.....	27
Figura 20: Medida da relaxação em ZFC: Concentrador de Fluxo.....	29
Figura 21: Medida da relaxação em ZFC: $\frac{3}{4}$ de Hallbach.....	29
Figura 22: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 0,13 mm/s e FC a 30 mm.....	31
Figura 23: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 0,13 mm/s e FC a 35 mm.....	32
Figura 24: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 1,25 mm/s e FC a 30 mm.....	33
Figura 25: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 1,25 mm/s e FC a 35 mm.....	34
Figura 26: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 10 mm/s e FC a 30 mm.	35
Figura 27: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 10 mm/s e FC a 35 mm.	35
Figura 28: Medidas da força de levitação magnética para diferentes velocidades de aproximação. O gap final de todas as curvas é de 10 mm, configuração Concentrador de Fluxo.	36
Figura 29: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 0,13 mm/s e FC a 35 mm, configuração $\frac{3}{4}$ de Hallbach.....	37
Figura 30: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 1,25 mm/s e FC a 35 mm, configuração $\frac{3}{4}$ de Hallbach.....	38
Figura 31: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 10 mm/s e FC a	

35 mm, configuração $\frac{3}{4}$ de Hallbach	39
---	----

Figura 32: Medidas da força máxima de levitação magnética para diferentes velocidades de aproximação. O gap final de todas as curvas é de 10 mm, configuração $\frac{3}{4}$ de Hallbach.	39
---	----

Figura 33: Em (a) e (b) Anomalias da força constante exercida sobre a célula de carga e (c) Sistema de medidas utilizando apenas a célula submetida à força vertical constante	41
--	----

Índice de Tabelas

Tabela 1: Tabela de configuração da resolução do motor de passo	26
Tabela 2: Tabela comparativa entre a força de levitação máxima para diferentes velocidades e alturas iniciais. O gap é de 10 mm.	40

Capítulo I - Introdução

O objetivo deste trabalho consiste em investigar a dependência temporal da relaxação da força de levitação magnética em mancais lineares supercondutores, considerando o resfriamento na ausência (ZFC – *zero field cooling*) e presença (FC – *field cooling*) de campo magnético. Esta dependência se dá devido à relaxação das linhas de fluxo aprisionadas no supercondutor (*flux creep*). A análise do comportamento da força de levitação em função do tempo é fundamental para dar suporte ao desenvolvimento de um veículo de levitação supercondutora, onde o decréscimo da magnitude desta força deve ser levado em consideração.

Neste estudo desenvolveu-se um sistema de medidas que visa analisar a relaxação da força de levitação em mancais magnéticos supercondutores. Neste sistema, é possível analisar o caráter histerético da força entre um supercondutor e um imã permanente, o que torna a força de levitação uma função da velocidade de aproximação entre o supercondutor e o imã. Este sistema também permite a obtenção do perfil de campo magnético de magnetos, assim como o estudo da dinâmica dos vórtices através das medidas de *flux creep*, que leva em conta o relaxamento por ativação térmica dos tubos de fluxo dentro do supercondutor.

Esse fenômeno de arraste de fluxóides (tubos de fluxo) no interior do supercondutor é caracterizado por apresentar uma natureza termodinâmica[1], de decaimento exponencial, o que torna sua ocorrência independente das grandezas elétricas e magnéticas aplicadas ao material.

Os capítulos deste texto estão dispostos da seguinte maneira:

No presente capítulo, serão apresentadas as técnicas de levitação utilizadas nos sistemas de transporte em massa e a proposta da levitação supercondutora tendo como principal projeto o Maglev-Cobra, que poderá ser o primeiro sistema em escala operacional no mundo.

No capítulo II, apresenta-se uma breve introdução ao estudo da supercondutividade e suas propriedades. Neste capítulo também apresentado as suas aplicações, bem como as características do veículo supercondutor.

No capítulo III, apresenta-se o efeito de relaxação das linhas de fluxo no supercondutor (*flux creep*) que é o objeto de estudo deste trabalho a fim de verificar a dependência logarítmica da força de levitação magnética em função do tempo.

No capítulo IV, serão apresentadas as características inerentes aos mancais magnéticos supercondutores e as diferentes topologias de mancais utilizadas no sistema de medidas da força de levitação magnética.

No capítulo V, é apresentado o sistema de medidas capaz de realizar as leituras de força magnética em virtude da interação entre o supercondutor e o trilho magnético. Este sistema de medidas é composto por um motor de passo, uma guia linear, uma célula de carga e uma placa de aquisição de dados para a obtenção dos sinais da força de levitação magnética provenientes da célula de carga bidirecional que é um instrumento de medida que realiza a medição de forças aplicadas a ela.

No capítulo VI, são apresentados os resultados das medidas de força de levitação magnética do mancal magnético em função da distância e da velocidade de aproximação entre o supercondutor e o trilho magnético, comparando as medidas realizadas com as duas topologias de trilho magnético: Concentrador de Fluxo e $\frac{3}{4}$ de Hallbach.

No capítulo VII, são discutidos os resultados obtidos e apresentados alguns passos importantes de melhoria para este sistema de medidas como a utilização de um novo modelo de célula de carga.

1.1. Tipos de Levitação Magnética

As técnicas de levitação magnética, oriundas da intensidade da força que produzem, podem ser empregadas em sistemas de transporte de média ou alta velocidade, no qual evidencia a necessidade de transportes públicos cada mais vez eficientes e com custos de implantação competitivos. Por isso, as técnicas de levitação em aplicações em transporte de massa podem ser subdivididas em três grupos, conforme serão descritos a seguir:

1.1.1. Levitação Eletrodinâmica (EDL)

Este tipo de levitação necessita do movimento de um campo magnético nas proximidades de um material condutor. A proposta japonesa de trem de levitação, LEVMAG (<http://www.rtri.or.jp>), está calcada neste princípio. Existe uma linha dupla para demonstração e testes, com extensão de 18,4 km, em Yamanashi, localidade entre Tóquio e Osaka, operando desde 1997[2].

A técnica baseia-se na movimentação relativa entre um magnético e uma lâmina condutora (e.g., alumínio), no qual correntes parasitas serão induzidas no condutor. Estas correntes, por sua vez, gerarão outro campo magnético no qual, pela lei de Lenz, irão se opor ao campo criado pelo material magnético conforme observado na Figura 1. A interação entre estes dois campos gerará uma força repulsiva no material magnético. Esta força aumenta com a velocidade e é a responsável pela levitação. O sistema, caso seja convenientemente ajustado, é naturalmente estável. Uma

desvantagem com relação a esta técnica é a necessidade de rodas de apoio para serem usadas em baixas velocidades.

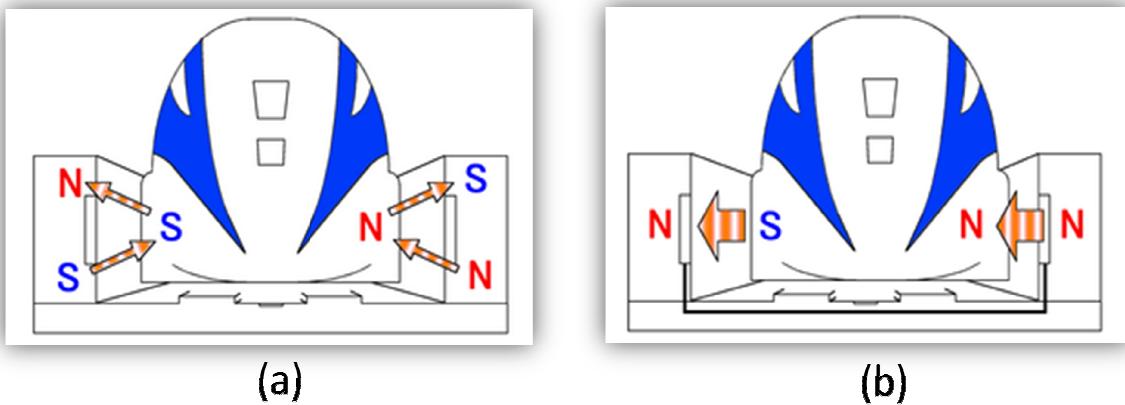


Figura 1: Exemplo de trem MAGLEV com a tecnologia EDL: (a) Sistema de levitação (b) Sistema de tração.

1.1.2. Levitação Eletromagnética (EML)

Este tipo de levitação possui a proposta alemã de trem de levitação, Transrapid (<http://www.transrapid.de>), que está implantada comercialmente, desde Janeiro de 2004, em uma conexão de 30 km entre Pudong Shanghai International Airport e Shanghai Lujiazui, um distrito financeiro. O fundamento físico básico desta aplicação explora a força de atração que existe entre um eletro-ímã e um material ferromagnético conforme Figura 2. Uma desvantagem inerente à este tipo de levitação é que a estabilidade ocorre somente com um sistema de controle e regulador devidamente sintonizado.

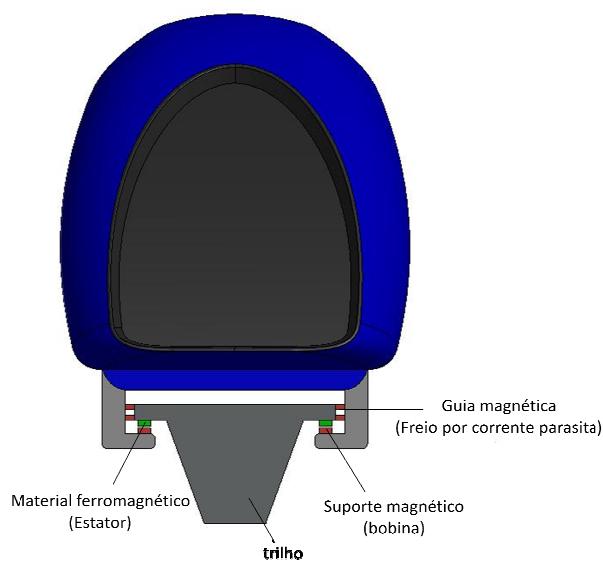


Figura 2: Representação esquemática de um veículo de levitação eletromagnética (EML).

1.1.3. Levitação Supercondutora (SML)

Uma das mais promissoras técnicas de levitação baseia-se na propriedade diamagnética dos supercondutores para exclusão do campo magnético do interior dos supercondutores. No caso dos supercondutores do tipo II, esta exclusão é parcial, o que diminui a força de levitação, porém permite maior estabilidade, o que representa um importante diferencial em relação aos métodos EDL e EML. No Brasil, este tipo de levitação possui como principal projeto o Maglev-Cobra, que poderá ser o primeiro país do mundo a possuir uma linha operacional em escala-real desta tecnologia. Mais detalhes sobre o projeto serão apresentados no capítulo seguinte.

A vantagem em se utilizar esta tecnologia deve-se ao fato de utilizar trilhos magnéticos que consomem menos energia, manutenção mais simples e barata, entre outros. Comparativamente, a potência necessária para levitar um veículo baseado no método EML ou EDL é da ordem de 1,7kW/t. No caso da levitação supercondutora, a potência necessária para levitação é praticamente zero, no entanto, a linha de imãs, necessária para promover o efeito diamagnético, é mais cara que a infra-estrutura das opções EML ou EDL. Tendo em vista que no transporte urbano, constituem-se pequenas distâncias entre estações e baixas velocidades, a tecnologia SML é mais vantajosa. Portanto, a proposta Maglev-Cobra para o transporte urbano da UFRJ é a mais conveniente, enquanto que, para ligações de alta velocidade, as tecnologias EML e EDL são as mais adequadas [2].

Capítulo II - A supercondutividade

2.1. Introdução histórica

Supercondutividade é o nome dado a combinação das propriedades elétricas e magnéticas que aparecem quando determinados materiais são resfriados a temperaturas extremamente baixas. Este efeito só pôde ser descoberto após 1908, quando Kamerling Onnes conseguiu liquefazer o hélio como fluido refrigerante, obtendo temperaturas por volta de 2 K. Onnes (1911) estava investigando a resistividade do mercúrio a baixas temperaturas. O esperado era que a resistividade decaísse gradativamente com a diminuição da temperatura até um valor finito não-nulo, mas sua resistividade abruptamente passava para valores não mensuráveis a uma dada temperatura denominada *temperatura crítica* (T_c).

Um marco importante na história da supercondutividade (Figura 3) foi a descoberta, em 1986, de supercondutores com elevada temperatura crítica que revolucionou o campo de pesquisa sobre

supercondutividade. Além disso, os supercondutores com alta temperatura crítica possibilitaram a utilização de líquidos refrigerantes mais baratos, como o nitrogênio líquido, cuja produção demanda um menor gasto de energia.



Figura 3: Ilustração do fenômeno da supercondutividade

A total inexistência de resistividade elétrica em um supercondutor em temperaturas abaixo de T_c é a propriedade mais conhecida dos supercondutores. Outra característica dos supercondutores é que acima de um determinado valor de campo magnético ou corrente elétrica, o supercondutor, mesmo abaixo da temperatura crítica, passa a se comportar como um condutor normal apresentando um valor de resistência diferente de zero. Assim, para essa característica, definem-se um *campo magnético crítico* (H_c) e uma *corrente crítica* (I_c). Portanto, quando submetido a um campo magnético superior a H_c , a temperatura em que a resistência elétrica se anula diminui, e se este campo for extremamente forte, ele pode suprimir totalmente o estado supercondutor.

Analogamente, o supercondutor, quando percorrido por uma corrente elétrica também superior a um valor crítico, o estado supercondutor também é destruído. Nos elementos supercondutores, o valor crítico para esta corrente está relacionado ao valor do campo magnético produzido pela própria corrente na superfície da amostra.

Em 1933, Meissner e Ochsenfeld observaram que, ao se resfriar alguns metais até uma temperatura crítica T_c sob a presença de um campo magnético aplicado H_0 , apresentavam a propriedade de expulsar totalmente as linhas de campo do seu interior, produzindo uma blindagem ao fluxo magnético, ou seja, uma densidade de fluxo magnético nula no interior do material (Figura

4). Esta propriedade foi denominada Efeito *Meissner*. Portanto, as características básicas de um material supercondutor são a resistividade nula e o diamagnetismo perfeito.

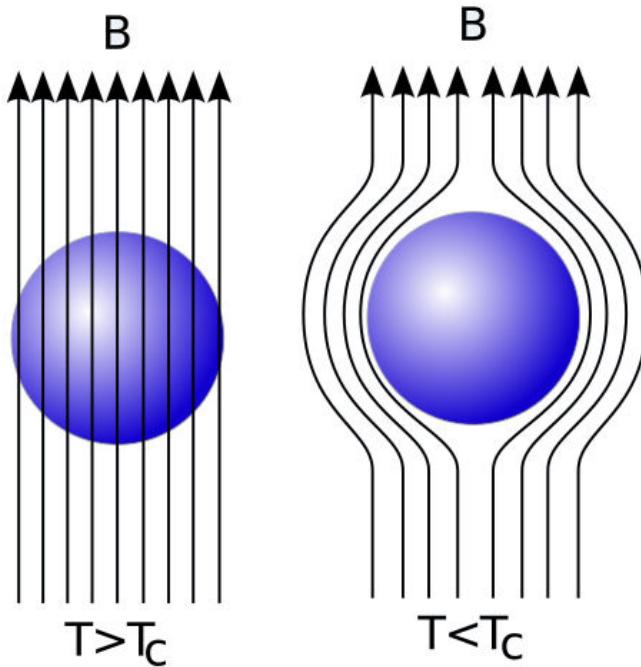


Figura 4: Fluxo magnético no interior de um supercondutor do tipo I para (a) $T > T_c$ e (b) $T < T_c$.

Os supercondutores como um todo, apresentam o efeito Meissner até um determinado valor pequeno de campo magnético. Para valores mais elevados de campo, são observados comportamentos diferentes por parte dos supercondutores, o que leva à necessidade de classificar esses elementos por tipo de comportamento. Existem então os supercondutores do tipo I e do tipo II, que serão descritos em detalhes nas seções 2.2 e 2.3.

Observou-se também que certos metais e ligas apresentavam propriedades supercondutoras também acima da temperatura onde ocorria o efeito Meissner. Abrikosov, em 1957, afirmou que o comportamento diferente de alguns supercondutores não estava associado a efeitos de impurezas e sim a propriedades intrínsecas destes materiais, demonstrando também que a penetração de fluxo de campo nos supercondutores do tipo II organizando-se em estruturas tubulares denominadas rede de fluxóides, que é uma solução para as equações de Ginzburg-Landau no estado misto. Este grupo de metais e ligas, que apresentam este comportamento, forma outra classe de supercondutores, que foi denominada de tipo II. Desde então o estado misto dos supercondutores do tipo II vem sendo alvo de muitos estudos [3].

Por muito tempo, pensou-se que todos os supercondutores se comportavam da mesma maneira. É sabido que há dois tipos de supercondutores, classificados como tipo I e tipo II. Eles

possuem muitas características em comum, mas diferem no comportamento magnético. Estas diferenças serão apresentadas mais detalhadamente adiante.

Na tentativa de explicar a movimentação e o aprisionamento dos fluxóides, muitos modelos teóricos foram desenvolvidos e várias experiências foram propostas para a observação deste fenômeno. Dentre estes modelos, o que vem ao encontro dos estudos é o de “Anderson-Kim”[4]. Os primeiros estudos baseados neste modelo consistem na descrição da dependência entre a corrente e o campo elétrico. Ele é baseado na dependência logarítmica entre a energia de ativação e a corrente que percorre o supercondutor. Tornando a ativação térmica como um fator de grande importância para a movimentação de fluxo, mas a própria imperfeição das cerâmicas supercondutoras trouxe uma gama de novos efeitos e novos regimes, formando o complexo quadro atual da movimentação de vórtices.

Embora os supercondutores do tipo I não sejam objeto de estudo no trabalho proposto, neste capítulo, foi apresentada uma pequena parte das idéias básicas de relaxação magnética em supercondutores do tipo II, evitando a sofisticação matemática das teorias envolvidas para atingir nossos objetivos básicos.

2.2. Supercondutores tipo I

Os supercondutores do tipo I e do tipo II possuem respostas diferentes quanto à aplicação de campos magnéticos. Os do tipo I obedecem estritamente ao efeito Meissner até um campo crítico termodinâmico H_c , no qual começa então a penetrar campo no volume. Acima deste campo, o material retorna para o estado normal de maneira mais ou menos abrupta, dependendo da forma geométrica da amostra. Logo, os supercondutores do tipo I apresentam somente o estado Meissner. Neste estado, não pode haver penetração de fluxo magnético surgindo correntes que blindam o material. Essa blindagem é suficiente até um valor de campo magnético crítico H_c . Acima deste valor, o material supercondutor transiciona para o estado normal. Este tipo de supercondutor não possui nenhum estado intermediário, no qual as variáveis que determinam o estado do material são a temperatura, o campo magnético aplicado e a corrente que ele transporta como veremos mais adiante.

2.3. Supercondutores tipo II

Não se atentando aos cálculos da modelagem dos supercondutores, utilizando-se da teoria de Ginzburg-Landau[5], Abrikosov[22] prediz que deveria existir uma segunda classe de supercondutores na qual, se for aplicado um campo magnético com intensidade suficiente, ocorre a penetração do campo na forma de linhas de fluxo quantizado organizando-se na forma de uma rede no interior da amostra. Estas estruturas tubulares (ou linhas de fluxo) formam o que chamamos de *fluxóides*. Devido a esse comportamento ser essencialmente diferente do apresentado pelos supercondutores tradicionais, Abrikosov denominou essa nova classe como supercondutores do tipo II para diferenciá-los da variedade anterior agora chamada de tipo I.

Diferentemente dos supercondutores do tipo I, que possuem a sua supercondutividade finalizada quando um campo magnético exterior superior a H_c é aplicado, os supercondutores do tipo II possuem a característica de aprisionarem parte do campo magnético em seu interior (Figura 5(c)), por meio de vórtices de correntes. É importante destacar que para que ocorra a penetração do fluxo nos supercondutores do tipo II é necessário que o campo aplicado esteja entre dois valores de campos críticos, H_{c1} e H_{c2} [6].

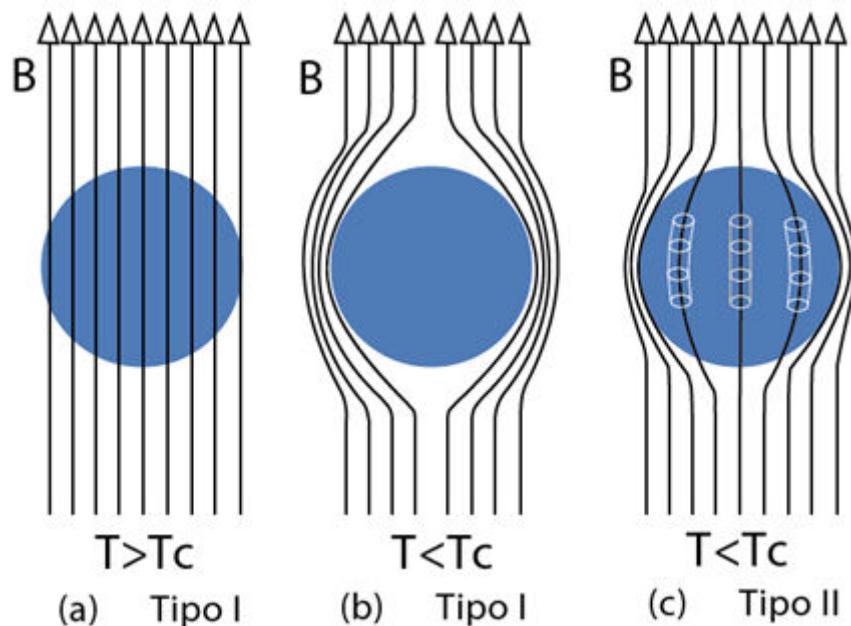


Figura 5: Configuração do fluxo magnético no interior de um supercondutor para uma temperatura T
 (a) acima de T_c e (b) abaixo de H_{c1} (Efeito Meissner) e (c) entre H_{c1} e H_{c2} (estado misto).

Uma vez que o campo externo seja inferior a H_{c1} , o supercondutor encontra-se no estado Meissner, conceito este explicado anteriormente. Assim, o supercondutor comporta-se de forma similar aos do tipo I. Porém, quando o campo magnético aplicado possui valores entre H_{c1} e H_{c2} , o material passa a não apresentar mais o diamagnetismo perfeito e passa para um estado conhecido como *estado misto*. Neste estado há no interior da amostra, regiões supercondutoras e regiões normais, onde as últimas encontram-se em regiões distribuídas homogeneousmente no material e cercadas por regiões supercondutoras. Essas regiões normais recebem o nome de *fluxóides* e distribuem-se no material condutor formando uma rede dita triangular ou hexagonal, que será explicado em maiores detalhes na seção 2.4.

Os valores dos campos críticos dependem da temperatura. A magnetização é máxima em H_{c1} pois este é o valor máximo do campo que a amostra suporta sem haver penetração de fluxo. Ela volta a ser nula em H_{c2} , acima do qual a amostra está no estado normal. A penetração ou não de fluxo no material se dá pela configuração energética da superfície deste. Ao contrário dos supercondutores do tipo I, a penetração de fluxo é possível nos supercondutores do tipo II pelo fato do alto valor do campo crítico H_{c2} . Por este motivo, os supercondutores do tipo II são utilizados na maioria das aplicações práticas.

2.4. Redes de Abrikosov

Juntamente com a teoria sobre o estado misto, Abrikosov deduziu de maneira notável que o campo magnético penetra no volume do supercondutor do tipo II, na forma de tubos ou cilindros chamados de fluxóides. A compreensão deste fenômeno é fundamental para o estudo da relaxação magnética nos supercondutores (*flux creep*). A estrutura interna de um supercondutor do tipo II com a presença da rede de fluxóides é ilustrada na Figura 6. Em distâncias grandes, o campo magnético H decai exponencialmente com o raio do tubo de fluxo, com um comprimento característico denominado profundidade de penetração de London (λ_L) que representa um parâmetro de extrema importância na caracterização de um supercondutor [7].

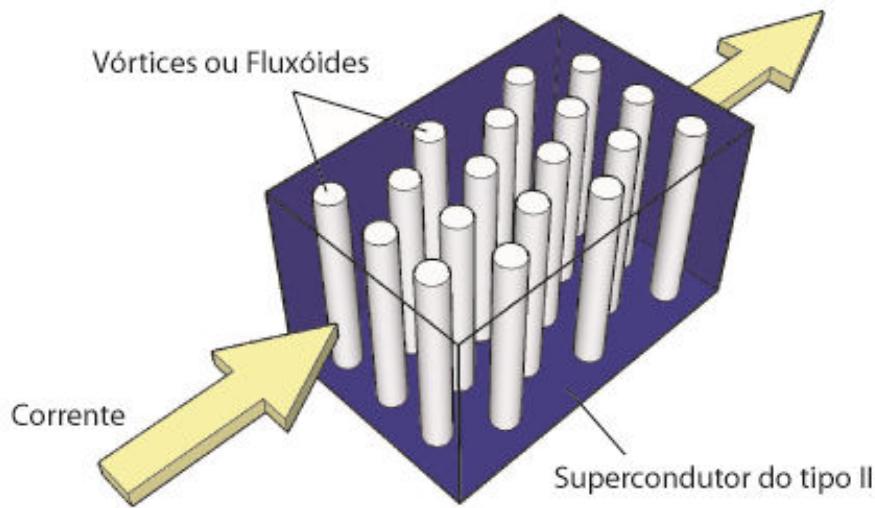


Figura 6: Disposição da estrutura dos tubos de fluxo no supercondutor do tipo II na presença de um campo externo aplicado com magnitude entre H_{c1} e H_{c2} .

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 mover na direção transversal à corrente, o que induz uma voltagem resistiva na direção longitudinal. Para que a corrente flua sem resistência, o movimento das linhas de fluxo deve ser impedido de alguma forma, o que pode ser feito já que qualquer não-homogeneidade espacial, como por exemplo impurezas na rede cristalina do material, tende a segurar os vórtices se a corrente de transporte for suficientemente baixa. Esses sítios de aprisionamento na estrutura do material são chamados de centros de *pinning*.

Uma das primeiras teorias sobre o movimento das linhas de fluxo foi elaborada por Anderson e Kim, na qual estudaram o movimento termicamente ativado dos vórtices na presença de centros de *pinning*, que consiste de saltos de vórtices de uma impureza à outra. Essa teoria, chamada de teoria de *flux creep*, 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 centros de aprisionamento.

2.5. Aplicações da Supercondutividade

Algumas aplicações da supercondutividade já são usadas na prática em laboratórios, em aceleradores de partículas e em hospitais. Contudo, outras aplicações da supercondutividade se tornarão economicamente viáveis futuramente. Neste trabalho descreveremos apenas as principais

aplicações da supercondutividade. A seguir, uma breve descrição das mais relevantes aplicações da supercondutividade.

Aplicações no armazenamento da energia elétrica

Os estudos objetivando aplicações da supercondutividade na geração e no armazenamento da energia elétrica constituem pesquisas tecnológicas extremamente importantes. Embora sejam viáveis tecnicamente, as bobinas supercondutoras ainda não são economicamente viáveis.

Os dispositivos utilizados para o armazenamento direto da energia elétrica como, por exemplo, baterias, pilhas e outros dispositivos só podem ser usados durante um período muito curto após receber sua "carga máxima"[8]. O único método de armazenamento de energia elétrica sem nenhuma perda consiste na utilização de bobinas supercondutoras ou de anéis supercondutores, conhecidos por SMES, do inglês *Superconducting Magnetic Energy Storage*, que armazenam permanentemente esta energia sob a forma de energia magnética através das correntes persistentes que circulam em uma bobina supercondutora.

Aplicações na física das altas energias

As bobinas supercondutoras são capazes de produzir fortes campos magnéticos. Esses fortes campos magnéticos gerados pelas bobinas supercondutoras também possuem potenciais aplicações em laboratórios de pesquisa, nas indústrias e na Medicina para obtenção de imagens por ressonância magnética (conhecida pela sigla MRI). Em particular, as bobinas supercondutoras são usadas na física das altas energias, como, por exemplo, nos aceleradores de partículas nos quais geralmente são necessários campos magnéticos superiores a 1 T. Nos aceleradores de partículas e em projetos de pesquisas físicas envolvendo altas energias de um modo geral, o uso dessas bobinas se justifica, apesar do custo extremamente elevado, porque as bobinas normais não são capazes de produzir os fortíssimos campos magnéticos exigidos nos equipamentos usados nessas pesquisas[8].

Aplicações na Medicina

A Medicina geralmente é a primeira beneficiária das aplicações da Física. Existem dois tipos de aplicação da supercondutividade na Medicina: as *aplicações em grande escala* que exigem fortes campos magnéticos (geralmente superiores a 0,5 T) e as *aplicações em pequena escala* que exigem fraquíssimos campos magnéticos (geralmente menores do que 1 μ T). Das aplicações em grande

escala a mais importante consiste no uso de bobinas supercondutoras para a obtenção de imagens por ressonância magnética (MRI).

As principais pesquisas na medicina inerentes à supercondutividade visam obter: um *magnetocardiograma* para registrar a atividade do coração e um *magnetoencefalograma* para registrar a atividade do cérebro.

Aplicações nos Transportes

O trem Maglev é um transporte de massa que teve seu desenvolvimento pioneiro no Japão. Este trem, que já está em operação experimental, se desloca sem contato com o trilho e recebe impulsão magnética através da ação de bobinas supercondutoras.

Alguns estudos revelam o esgotamento dos transportes aéreos, pois exigem aeroportos que ocupam enormes áreas nas vizinhanças de grandes cidades. O transporte ferroviário poderá substituir grande parte dos transportes aéreos com mais economia e sem a necessidade do uso de enormes aeroportos, uma vez que o trem pode ir diretamente de um centro urbano a outro. O uso da tecnologia para aplicação de transportes de massa justifica-se por inúmeras vantagens como: ausência de ruído e poluição, menor consumo de energia.

2.6. Veículo Maglev-Cobra

A necessidade de transporte público eficiente, não poluidor e com custos de implantação competitivos, faz parte das prioridades do mundo moderno, onde uma grande parte da população concentra-se em metrópoles. Por este motivo, o Maglev-Cobra possui uma série de vantagens. A primeira é de ser um veículo não poluente e segundo seus criadores, é econômico tanto no consumo de energia, quanto no custo de construção. Um exemplo disso é baseado nos cálculos de construção do metrô subterrâneo que tem o custo de R\$ 100 milhões por km, uma vez que o trem de levitação carioca terá um custo de cerca de R\$ 33 milhões por km, o que corresponde a um terço do valor. Enquanto que o consumo de energia do Maglev-Cobra é de apenas 25 kJ/passageiro.km – unidade de medida da quantidade de energia gasta para transportar cada passageiro por um quilômetro, a de um ônibus é de 400 kJ/passageiro.km. Outra vantagem refere-se ao sistema de refrigeração que se concentra no ponto de embarque e no interior do veículo. Ao contrário de outros sistemas como o metrô, este consome menos energia, pois não desperdiça o ar para áreas que dispensam a refrigeração como os túneis, o que normalmente gera muito consumo de energia para se dar bem estar aos usuários dos trens convencionais.

O desenvolvimento do Maglev consiste em uma tecnologia que se baseia na propriedade diamagnética dos supercondutores para exclusão do campo magnético do interior dos supercondutores. No caso dos supercondutores do tipo II, como visto anteriormente, esta exclusão é parcial, o que diminui a força de levitação, mas conduz à estabilidade, dispensando sistemas de controle sofisticados ou rodas, principais vantagens em relação aos sistemas de levitação eletromagnética e eletrodinâmica, respectivamente. A principal proposta é substituir parte da frota de ônibus que circula no campus da Cidade Universitária.

O primeiro passo para o desenvolvimento do trem Maglev-Cobra foi a construção de um módulo em escala real de 1 m de comprimento (Figura 7) que permitirá o aprofundamento e validação desta nova modalidade aplicada ao transporte urbano de média velocidade. Este protótipo é composto de alumínio e seu peso é de 160 kgf (sem carga). A seção é suportada por 4 criostatos constituídos de blocos supercondutores YBCO que levitam a uma distância (gap) entre 25 mm (sem carga) e 5 mm (a plena carga)[9].



Figura 7: Protótipo em escala real do veículo supercondutor. A figura a direita mostra com detalhes um dos criostatos sobre o trilho magnético.

A propriedade diamagnética dos supercondutores representa um grande diferencial em relação aos métodos EDL e EML, em virtude do advento de novos materiais, como o $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Nd-Fe-B), e de pastilhas supercondutoras de alta temperatura crítica, como o $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) que podem ser resfriados com LN_2 (temperatura de ebulação de - 196° C).

Esses materiais supercondutores de alta temperatura crítica podem ser resfriados com nitrogênio líquido (LN_2) enquanto que os supercondutores convencionais necessitam de hélio líquido (temperatura de ebulição de - 269º C), o que torna o processo de refrigeração menos custoso para esses novos materiais. No protótipo brasileiro do circuito, construído pelo grupo proponente deste projeto, o formato oval possui 30 metros de extensão, com guia linear formada por imãs de Nd-Fe-B compondo o circuito magnético e interagindo com os supercondutores de YBCO para levitação.

Capítulo III - Efeito flux creep

Os fluxóides aprisionados, quando submetidos a um gradiente de densidade de fluxo, geralmente se movem no sentido decrescente deste, saltando entre os centros de aprisionamento devido à ativação térmica; este processo é conhecido como “*flux creep*”[7].

Idealmente, um supercondutor do tipo II no estado misto apresenta uma resistividade finita, porém quando apresenta não-homogeneidades em sua estrutura (defeitos estruturais e compostionais), este possibilita o aprisionamento dos fluxóides que penetram no material (*flux pinning*), podendo assim, apresentar uma resistividade nula. Este aprisionamento confere propriedades supercondutoras importantes ao material sendo uma das razões que torna possível a aplicação tecnológica desses supercondutores.

Num supercondutor real, as linhas de fluxo são aprisionadas por impurezas ou defeitos no material que causam variação espacial na energia e no comprimento da linha de fluxo. Estas inhomogeneidades podem ser deslocações, fronteiras de grãos, precipitações, defeitos causados por feixe de elétrons, deslocações planares na rede cristalográfica, ou por rugosidade na superfície[7].

3.1. Fatores relevantes ao aprisionamento de fluxo

Todos os materiais reais têm defeitos que interagem com as linhas de fluxo, aprisionando-as. Este processo de aprisionamento é um pré-requisito para o fenômeno de relaxação magnética.

Na ausência de aprisionamento, o arranjo de vórtices pode sempre chegar ao estado de equilíbrio termodinâmico, seja ele uma rede rígida ou um líquido de vórtices. A magnetização neste caso é “reversível”, isto é, não depende da história termomagnética da temperatura da amostra. Entretanto, há outro fenômeno físico introduzido pela presença do aprisionamento, que é essencial para a discussão da relaxação magnética. Trata-se da possibilidade de um estado de não equilíbrio ou de distribuição espacial não uniforme dos vórtices, que são capturados, ao menos

temporariamente, pelos centros de aprisionamento. A relaxação deste estado de não equilíbrio para o de equilíbrio termodinâmico (por saltos ou tunelamento dos vórtices entre os centros de aprisionamento) é acreditada como sendo o fenômeno básico que é observado em experimentos de relaxação magnética. A possibilidade de um arranjo de vórtices em não equilíbrio tem importância fundamental tanto pelo lado teórico como do prático. Em particular, um gradiente de densidade de vórtices num estado de não equilíbrio corresponde a um gradiente total no campo que, através da lei de Ampére, deve corresponder a uma corrente volumétrica.

A combinação das correntes de superfície (Meissner) e das correntes em torno dos vórtices, tipicamente devido à distribuição não uniforme do espaçamento entre as linhas de fluxo aprisionadas, cria um momento magnético de dipolo que pode ser medido. Este momento magnético de dipolo pode ser diamagnético (negativo) ou paramagnético (positivo), dependendo da história termomagnética da amostra, como será exemplificado mais adiante.

Uma melhor compreensão do comportamento dos vórtices aprisionados no estado de não equilíbrio vem de se considerar a força por unidade de volume exercida pelos vórtices, uns sobre os outros. Esta força possui uma forma similar à força de Lorentz da eletrodinâmica e é dada por 3.1.1,

$$\vec{F} = \left(\frac{1}{c} \right) \vec{J} \times \vec{B} \quad 3.1.1$$

onde \vec{J} é a média espacial da densidade de supercorrentes e \vec{B} é a média espacial da indução magnética.

Sem uma força de aprisionamento para se opor à força de Lorentz, os vórtices relaxarão para sua configuração uniforme do estado de equilíbrio, e as supercorrentes tenderão a zero. A densidade de corrente em que a força de Lorentz se iguala à força de aprisionamento máxima (na ausência da ativação térmica ou tunelamento quântico) determina a densidade de corrente crítica J_c .

A ativação térmica pode fazer com que os vórtices escapem de seus centros de aprisionamento e movam-se no sentido da força de Lorentz, diminuindo assim a densidade de corrente para valores abaixo de J_c . A liberação dos vórtices dos centros de aprisionamento é o mecanismo dominante da relaxação magnética nos supercondutores. Assim, a relaxação magnética e a redução da densidade de corrente estão correlacionadas[1].

3.2. Modelo Anderson-Kim

O modelo de Anderson-Kim[4] relaciona a densidade de corrente com o campo elétrico. Parte-se de uma dependência logarítmica da densidade de corrente para a energia de ativação. Este modelo provém da Lei de Arrhenius, que foi inicialmente utilizada para descrever a dependência da velocidade de uma reação química com a temperatura. Arrhenius propôs que os reagentes teriam que possuir uma quantidade de energia mínima para a ocorrência da reação química, chamada de *energia de ativação*. Aplicando-se a distribuição estatística de Maxwell-Boltzmann, pode-se determinar que o percentual de moléculas que possuem energia de ativação superior a $e^{\frac{-U}{kT}}$, onde U é a energia de ativação, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura do sistema. Assim, a velocidade da reação química é dada pela equação 3.2.1:

$$v = A e^{\frac{-U}{kT}} \quad 3.2.1$$

onde A é uma constante específica de cada reação e v é a velocidade da reação química.

O campo elétrico nos supercondutores é proveniente do movimento dos fluxóides. A movimentação desses fluxóides se dá de forma análoga ao apresentado para a reação química. Para que eles possam se mover, eles devem possuir uma energia de ativação, a qual nesse caso depende da densidade de corrente conforme a equação 3.2.2.

O modelo de Anderson-Kim consiste na descrição da dependência entre a corrente e o campo elétrico. Ele é baseado na dependência logarítmica entre a energia de ativação e a densidade de corrente que percorre o supercondutor [1], conforme a equação 3.2.2,

$$U(J) = U_c \ln\left(\frac{J_c}{J}\right) \quad 3.2.2$$

onde U_c é o valor crítico para energia de ativação. Relacionando com a expressão 3.2.2 da Lei de Arrhenius e considerando o campo elétrico análogo a velocidade da reação química, e definindo-se um campo crítico E_c característico do supercondutor e análogo a constante A , temos a equação 3.2.3.

$$E(J) = E_c e^{\frac{-U_c \ln\left(\frac{J_c}{J}\right)}{kT}} \quad 3.2.3$$

Na qual a equação 3.2.3 pode ser reescrita como:

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^{\frac{U_c}{kT}} \quad 3.2.4$$

Definindo-se $n = \frac{U_c}{kT}$, a equação acima pode ser reescrita como:

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad 3.2.5$$

Observa-se pela equação 3.2.5 que a relação entre a densidade de corrente e o campo elétrico depende da energia de ativação crítica U_c no qual depende das características da micro-estrutura do supercondutor, do campo magnético aplicado e da temperatura do sistema.

Alguns trabalhos indicam que o efeito de relaxação magnética nos supercondutores pode surgir da movimentação de fluxo (*flux creep*) termicamente ativado, que foram descritos primeiramente por Anderson e Kim[10] e mais tarde por Beasley *et al*[11]. O modelo básico de Anderson-Kim foi aplicado com sucesso por numerosos autores para explicar muitos dos dados de relaxação nos HTSC, especialmente em regimes de baixas temperaturas e baixos campos. Assim, o modelo mais simples de dependência linear de J na barreira de energia é explicado pelo modelo Anderson-Kim que evidencia estudos para realização de experimentos que comprovam o efeito *flux creep* no supercondutor [4].

Capítulo IV - Mancais magnéticos supercondutores

Os mancais magnéticos supercondutores baseiam-se na interação entre materiais 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/ou do histórico magnético do supercondutor e permite variar a rigidez do mancal.

A auto-estabilidade mecânica dos mancais supercondutores é uma grande vantagem sobre os outros dispositivos de levitação magnética. Essa estabilidade torna o sistema totalmente passivo, dispensando a necessidade de utilizar um sistema de controle e monitoramento da posição para a operação do mancal supercondutor, diferentemente do caso dos mancais eletromagnéticos ativos. Uma dificuldade encontrada para a implementação desses mancais é o elevado custo dos blocos supercondutores[3].

Para uma levitação estável, é necessário que parte do fluxo magnético seja aprisionado no supercondutor. A quantidade de fluxo aprisionada é inversamente proporcional à altura de resfriamento do supercondutor em relação à fonte magnética. Para os testes no sistema de medidas, foram realizadas medidas de força de levitação em dois mancais lineares supercondutores com diferentes topologias de distribuição do campo magnético: $\frac{3}{4}$ de Hallbach e Concentrador de Fluxo conforme Figura 8, que serão mais detalhadas posteriormente.

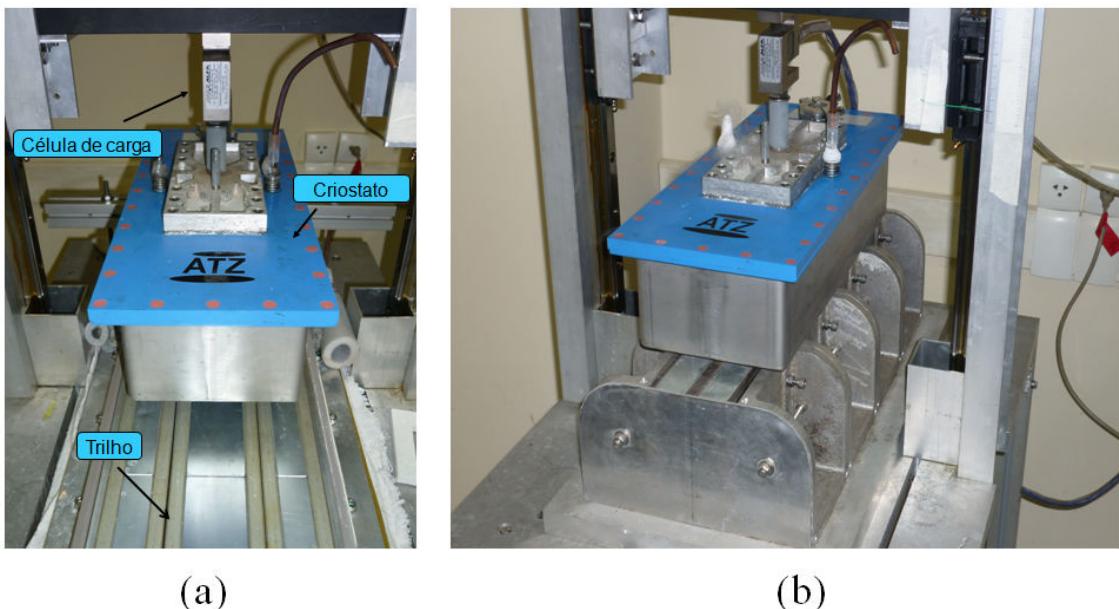


Figura 8: Mancal linear com o trilho magnético: (a) $\frac{3}{4}$ de Hallbach e (b) Concentrador de Fluxo.

Outra dificuldade apresentada por qualquer aplicação que utilize supercondutores é a necessidade de um sistema de refrigeração. Portanto, apenas depois da sintetização dos supercondutores de alta temperatura crítica, cuja temperatura de transição é acima da temperatura de liquefação do nitrogênio líquido (LN_2), houve um aumento no interesse nas aplicações destes materiais. Os veículos de levitação magnética Maglev utilizam mancais lineares supercondutores em sua locomoção, ao invés de mancais mecânicos, baseados na interação entre rodas e trilhos convencionais. Estes mancais são mais eficientes que os mancais mecânicos, uma vez que, por não haver contato mecânico entre a parte móvel e a parte fixa, há menor perda mecânica de energia, além de serem mais silenciosos.

No veículo Maglev, desenvolvido pelo LASUP, a parte móvel do mancal é composta por criostatos anexados ao veículo, enquanto a parte fixa é composta por um trilho magnético. Os criostatos, produzidos pela AdelwitzTechnologieZentrum GmbH (ATZ) da Alemanha, possuem grande resistência mecânica e suportam baixas temperaturas. Estes dispositivos são utilizados para a acomodação dos blocos supercondutores em seu interior. Cada criostato possui um total de 24 blocos supercondutores de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ (YBCO). Detalhes sobre as dimensões e orientação dos blocos de YBCO dentro do criostato bem como um esquema do mesmo são apresentados na Figura 9 [12].

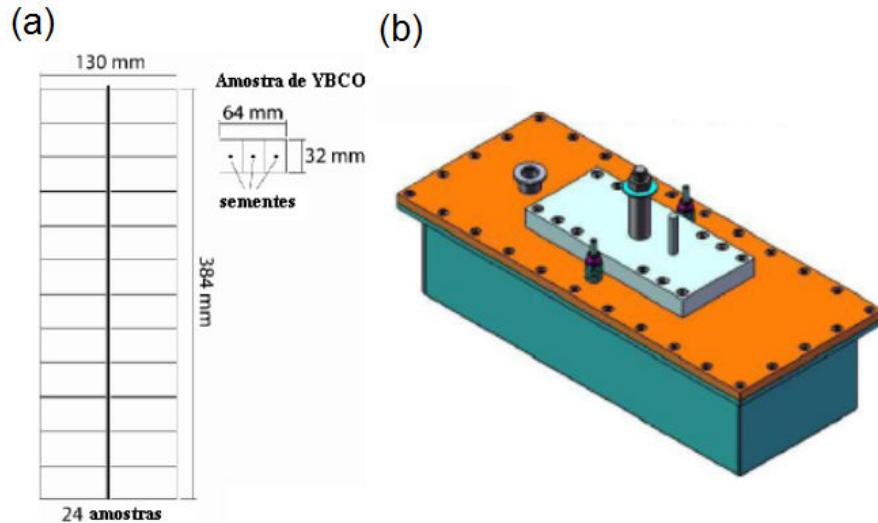


Figura 9: Detalhes do criostato utilizado. (a) Posicionamento e dimensões das amostras de YBaCuO (YBCO); (b) Esquema do criostato utilizado.

A parte magnética do mancal é constituída por um trilho de ímãs permanentes. Para o projeto Maglev-Cobra foi realizado um estudo com diversas configurações de trilhos. A configuração escolhida deve ser capaz de gerar uma força de levitação que atenda as restrições do projeto e

maximize a estabilidade. Um dos trilhos magnéticos analisados durante este processo, e utilizado nas medidas de força para este trabalho, pode ser visto na Figura 10. Este trilho é composto de ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B) com dimensões de 120 mm x 30 mm x 120 mm e magnetização na direção y. Entre os ímãs é colocado um espaçador de material ferromagnético (placas de aço), de forma a concentrar o fluxo magnético dos ímãs (Figura 10(b)). Devido a esta característica, este tipo de configuração é conhecido como Concentrador de Fluxo. Esta configuração é de difícil montagem, uma vez que os ímãs encontram-se com as faces de mesmo polo magnético muito próximas. Isso faz com que o conjunto ofereça uma enorme resistência em permanecer nesta configuração. Para contornar este problema cada par de ímãs e três placas de aço são acomodados em uma estrutura de alumínio fundido (Figura 10(a)), formando uma célula do trilho magnético. A seção do trilho utilizada para as medidas de força é composta pela união de quatro destas células [12].

A grande desvantagem em utilizar este tipo de configuração consiste em uma menor intensidade de fluxo magnético aprisionado com a utilização de uma seção de área (7.200 mm^2) de ímã permanente maior que a do $\frac{3}{4}$ de Hallbach (5.645 mm^2).

Em contrapartida, a configuração do trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach (Figura 11) apresenta o direcionamento do fluxo magnético, de forma que permitem maximizar a força de levitação para um mesmo volume de ímãs. Como desvantagem, esta configuração necessita de um aparato mecânico mais sofisticado para a montagem do trilho, que demanda maior tempo para sua montagem. Na Figura 12, é visto o protótipo do trilho magnético em questão para as medidas da força.

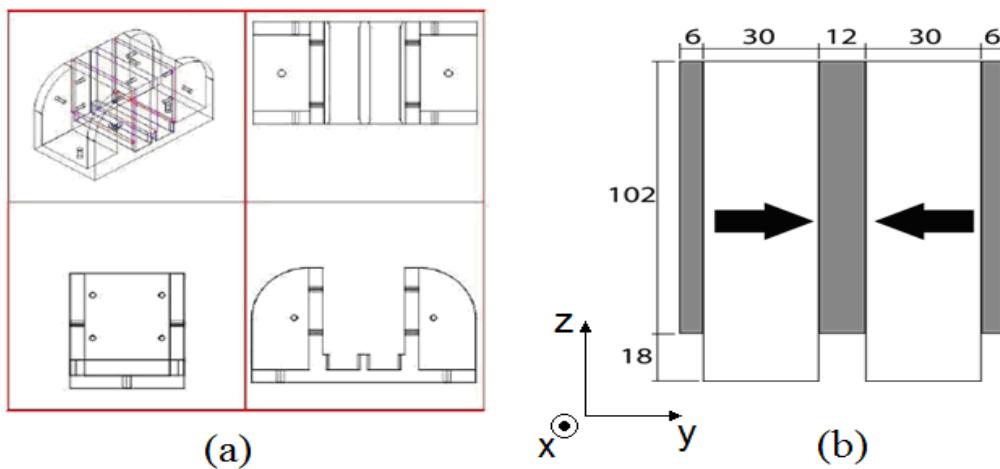


Figura 10: (a) Peça em alumínio fundido para montagem de uma célula do trilho magnético e (b) Seção transversal do trilho magnético com a configuração Concentrador de fluxo.

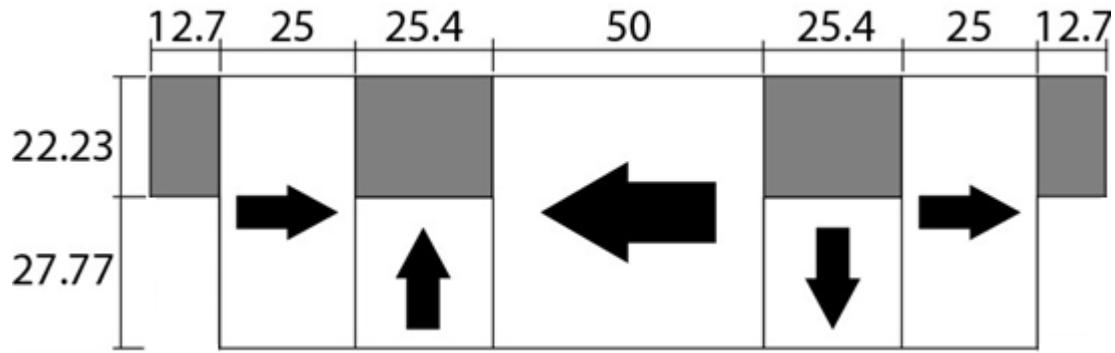


Figura 11: Configuração do trilho $\frac{3}{4}$ de Hallbach montada e testada no LASUP.

É sabido que tanto o valor da densidade de fluxo quanto o gradiente do mesmo são importantes para a força de interação entre o trilho e o supercondutor. Dessa forma, para uma análise da configuração espacial da densidade de fluxo magnético gerada pelo trilho, foi feito um mapeamento experimental da componente perpendicular da densidade de fluxo magnético (B_z), para diferentes alturas dos trilhos: Concentrador de Fluxo e $\frac{3}{4}$ de Hallbach ao longo do eixo y. Este mapeamento foi realizado a partir do uso de um sistema de mapeamento de fluxo magnético em uma dimensão. Este sistema é composto de um atuador linear, responsável pela movimentação, e um sensor Hall fixado na base deste atuador. Os resultados obtidos podem ser observados através da Figura 13 e da Figura 14. Pode-se perceber que o valor máximo da densidade de fluxo magnético na direção z é da ordem de 1 T a 2 mm do trilho Concentrador de Fluxo, o que indica que este trilho apresenta um grande valor de B_z , um dos índices de qualidade para a força de levitação.



Figura 12: Protótipo do trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach montado para os ensaios da força de levitação magnética.

Uma análise similar da configuração espacial da densidade de fluxo magnético do trilho $\frac{3}{4}$ de Hallbach pode ser verificado na Figura 14. Ainda que o valor máximo da densidade de fluxo seja menor quando comparado ao Concentrador de fluxo (ordem de 0.7 a 0.8T), verifica-se que, para a configuração de supercondutores utilizada, o trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach confere maior estabilidade mecânica aos mancais magnéticos supercondutores.

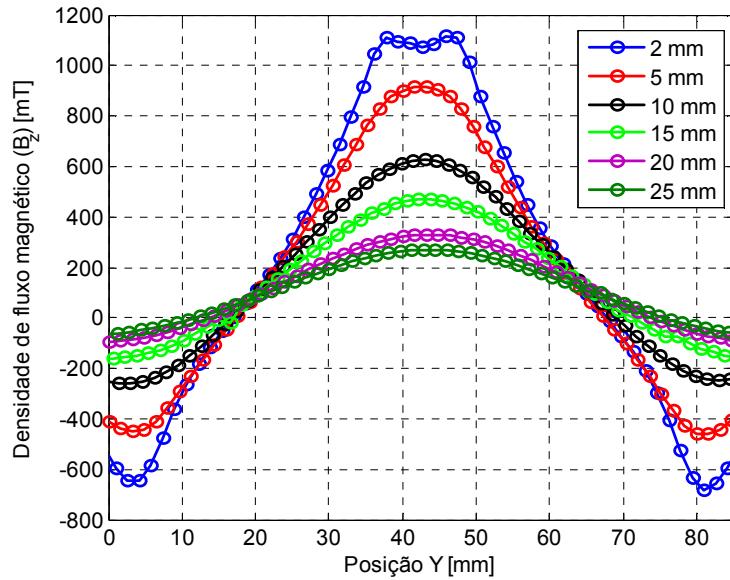


Figura 13: Componente z da densidade de fluxo magnético medida, configuração: Concentrador de Fluxo.

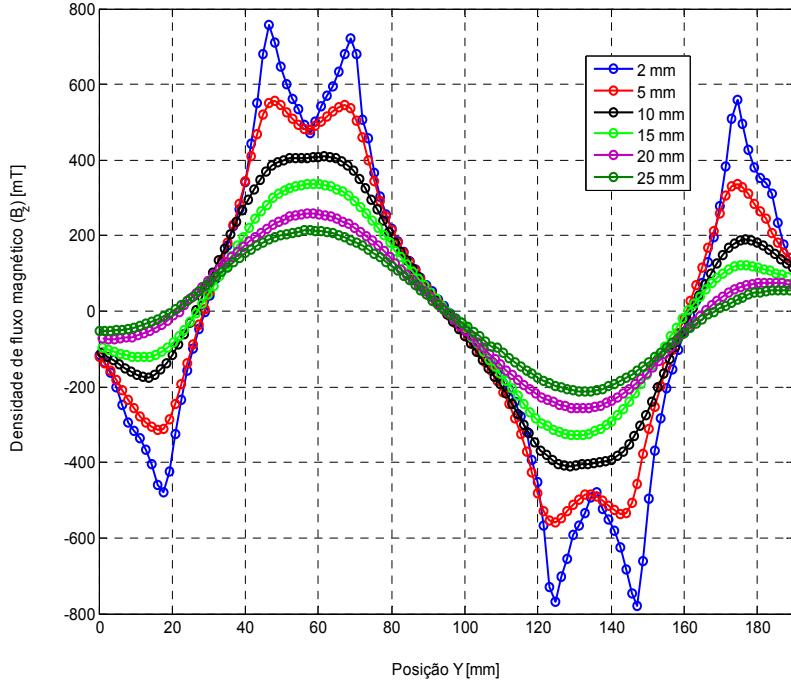


Figura 14: Componente z da densidade de fluxo magnético medida, configuração: $\frac{3}{4}$ de Hallbach.

Capítulo V - Sistema de medidas de força

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 deverá também ser capaz de realizar as leituras de força magnética nesta mesma direção, em virtude da interação entre o criostato e o trilho magnético. Esta medida será realizada por meio de uma célula de carga bidirecional. A célula de carga é um instrumento de medida (transdutor) que realiza a medição de forças aplicadas a ela. O princípio de funcionamento consiste nas Leis de Ohm e de Hooke. Ele possui um conjunto de resistores em seu interior, organizados segundo uma ponte de Wheatstone (Figura 15), que recebe o nome de extensômetro (em inglês, *strain gage*). De acordo com o estresse mecânico no qual o resistor está sujeito, ele sofre deformação, e sua resistência é alterada, gerando um sinal de tensão proporcional à força aplicada.

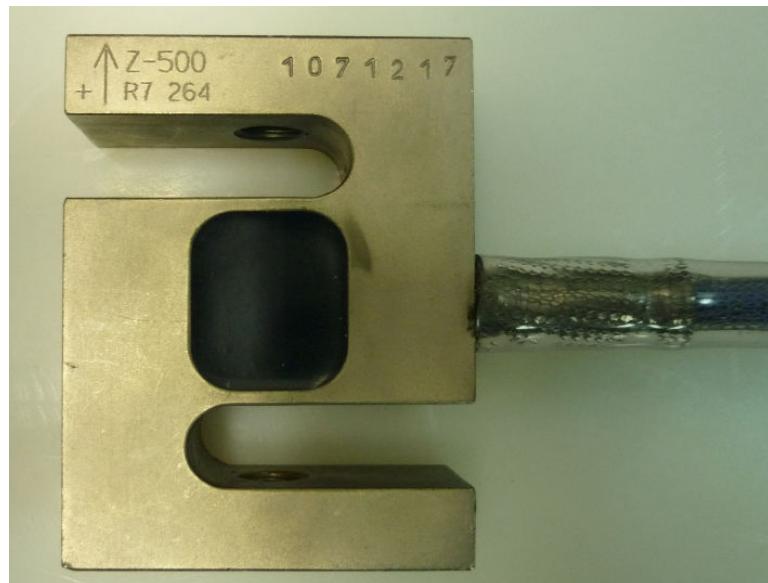


Figura 15: Célula de carga utilizada no sistema de medidas.

5.1. Acionamento do sistema

Dando prosseguimento ao funcionamento do sistema de medidas, o sinal de tensão proveniente da célula de carga é enviada para um computador por meio de uma placa de aquisição de dados (conversor A/D) Advantech modelo 1711 (Figura 17). Como estes sinais são muito baixos, antes de passarem pelo conversor, são amplificados por um amplificador operacional de instrumentação modelo INA111. Uma foto do sistema com todos os componentes necessários para sua operação pode ser vista na Figura 16.

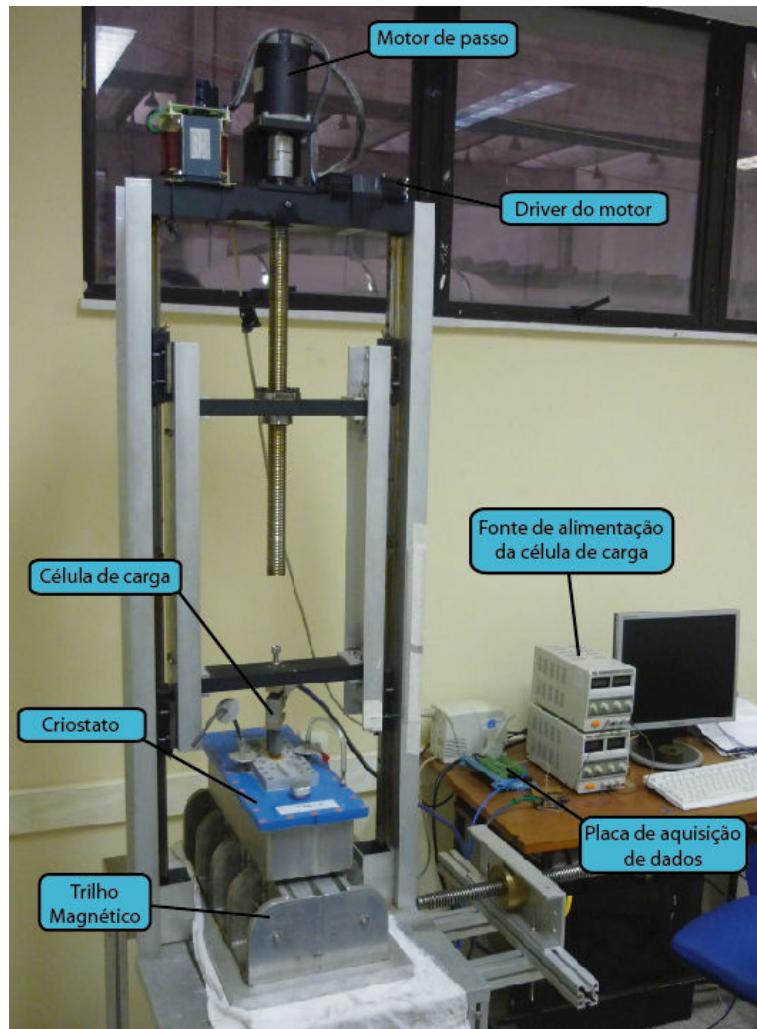


Figura 16: Sistema de medidas da força de levitação magnética

A comunicação com o micro-computador é feita usando o pacote Simulink do programa Matlab, através do "*Real Time WorkShop*" no modo de simulação em tempo real. Detalhes da configuração da placa de aquisição e do programa Simulink/Matlab podem ser encontrados em [13]. Este dispositivo facilita a aquisição de dados por parte do sensor de força e também o acionamento do motor de passo. Para acionamento do motor de passo é utilizado um conversor eletrônico responsável pelo interfaceamento entre os sinais gerados pelo computador e os interpretados pelo motor. Com isso, é possível criar uma lógica de pulsos dentro do ambiente gráfico do Simulink que, ao serem enviados ao conversor, permite a realização da medida desejada.

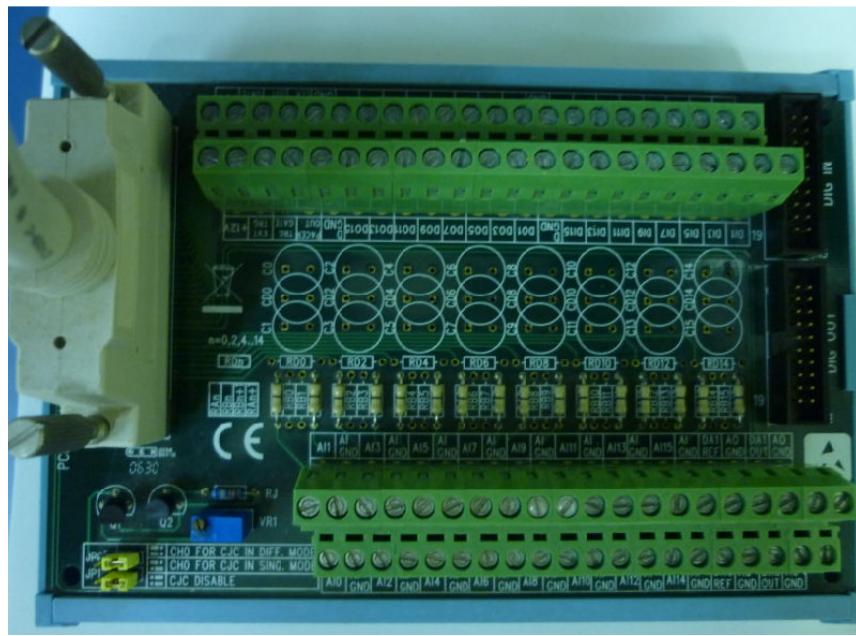


Figura 17: Placa de aquisição de dados Advantech 1711.

Na Figura 18 pode ser visto o diagrama de blocos do programa Simulink que realiza tal função.

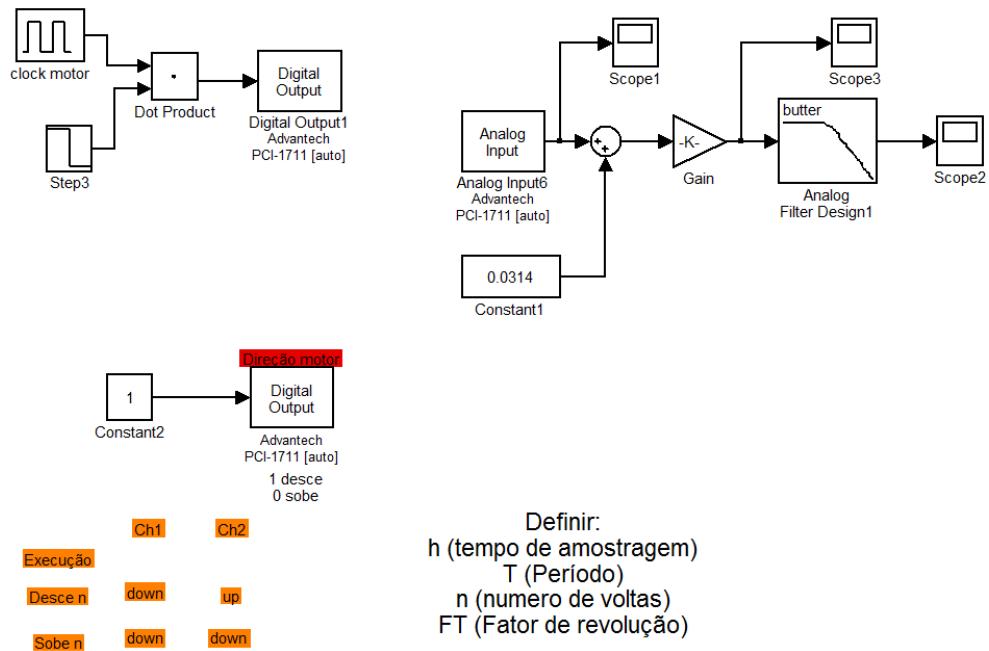


Figura 18: Arquivo do Simulink para a realização da medida de força de levitação em mancais supercondutores.

Conforme dito 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 supercondutor. 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 de um fuso de esfera. O motor de passo foi escolhido para a realização desta tarefa devido à facilidade no controle em malha aberta da posição angular do rotor e por ser um dispositivo que se adapta muito bem à lógica digital. Por isso sua popularidade em sistemas dinâmicos é muito grande.

Neste sistema de medidas, o controle da 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. Os parâmetros que determinam a velocidade de aproximação do supercondutor são:

$T=2*h$: Período em que o criostato aproxima-se do trilho magnético;

FT : Fator de revolução do motor de passo;

h : Tempo de amostragem (*sample time*);

Como o acionador linear do sistema se movimenta 5 mm por volta completa, a velocidade de aproximação do supercondutor à fonte magnética pode ser definida em 5.1.1:

$$\text{velocidade} = \frac{5}{T * FT} [\text{mm/s}] \quad 5.1.1$$

Na Tabela 1 pode ser visto o arranjo das chaves dip-switch do driver de potência modelo: MD808-128 para configuração de diferentes resoluções do motor de passo[14].

Tabela 1: Tabela de configuração da resolução do motor de passo

Switch*	Position*	MD808		MD808-128	
		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

O aparato experimental descrito anteriormente mostrou-se satisfatório para realização de medidas de força de levitação com deslocamentos em apenas uma direção do espaço (deslocamento vertical), o que irá permitir a realização das medidas de relaxação da força de levitação magnética nos mancais supercondutores.

Capítulo VI - Interação entre o criostato e os mancais supercondutores

Os ensaios foram realizados com o supercondutor resfriado na presença (Field Cooling - FC) e ausência (Zero Field Cooling – ZFC) de campo magnético. Nestes tipos de medidas, o supercondutor é resfriado com LN₂ na presença ou ausência do campo magnético gerado pelo trilho a uma altura inicial, denominada altura de resfriamento. Após este processo, o criostato inicia um movimento de aproximação ao trilho até uma altura mínima, com uma velocidade constante. Após a aproximação, o criostato permanece parado durante um período de 24 horas, sendo realizada continuamente a leitura da força de levitação. Esta seção apresenta os resultados obtidos para a força de levitação após o procedimento descrito anteriormente. A Figura 19 mostra uma foto do mancal linear magnético com o trilho e o criostato montados no sistema de medidas, pronto para a realização dos ensaios de força.

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos a partir das medidas realizadas para as duas diferentes topologias de trilho magnético descritas no capítulo 3. O tempo de medida da força de levitação para cada configuração de mancal supercondutor permitirá a análise da relaxação da força magnética ao longo do tempo.

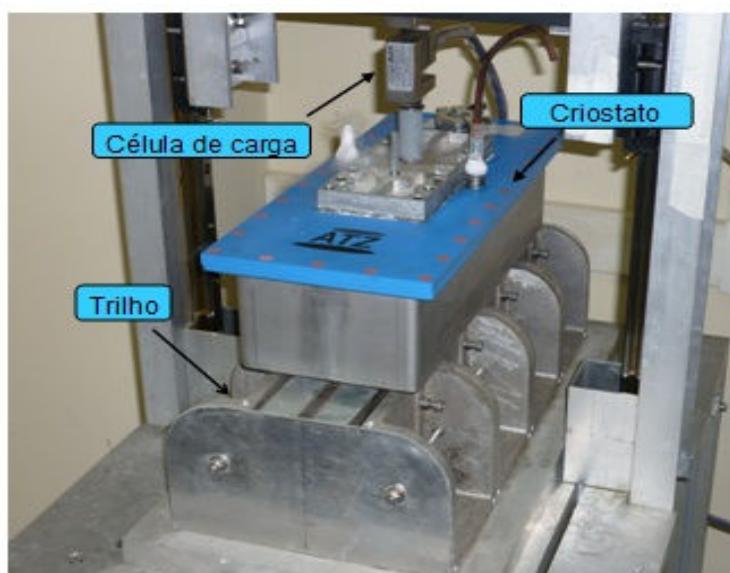


Figura 19: Célula de carga, trilho e criostato preparados para as medidas de força de levitação magnética.

Conforme descrito anteriormente, o mancal linear é composto de duas partes. A parte magnética, que consiste em um trilho montado utilizando ímãs permanentes e o bloco supercondutor, que consiste na parte móvel do mancal (veículo). Em uma primeira etapa foram realizadas medidas de força de levitação, em Zero Field Cooling, para duas diferentes configurações de trilho, Concentrador de Fluxo e $\frac{3}{4}$ de Hallbach.

6.1. Resultados e ensaios em ZFC

O primeiro teste realizado para os mancais supercondutores foi a medida da força de levitação em ZFC, que é fundamental para se obter o máximo da força de levitação em um mancal supercondutor. Essa medida de força mostrou-se bastante reproduzível usando-se o sistema de medidas apresentado na Figura 16. Foram realizadas medidas de força de levitação entre o criostato e o trilho para diferentes alturas de resfriamento. Os ensaios foram realizados com o criostato partindo da posição inicial de resfriamento a uma altura de 100 mm do trilho, no qual o campo magnético é praticamente nulo, e o criostato aproxima-se a uma altura mínima (*gap*) de 5 mm da superfície do trilho.

A Figura 20 mostra que a máxima força de levitação para este tipo de configuração (Concentrador de fluxo) corresponde a 1630 N e que a dependência do fenômeno termodinâmico faz com que a força decaia de forma exponencial ao longo do tempo, comprovando o efeito flux creep presente nos materiais supercondutores. Quando comparada com a força de levitação do trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach (Figura 21), constata-se que a força possui intensidade de 2545 N, maior quando comparada ao Concentrador de Fluxo. Esta diferença se deve ao melhor direcionamento do fluxo magnético que permite maximizar a força de levitação utilizando-se um menor volume de ímãs para a configuração de supercondutores utilizada.

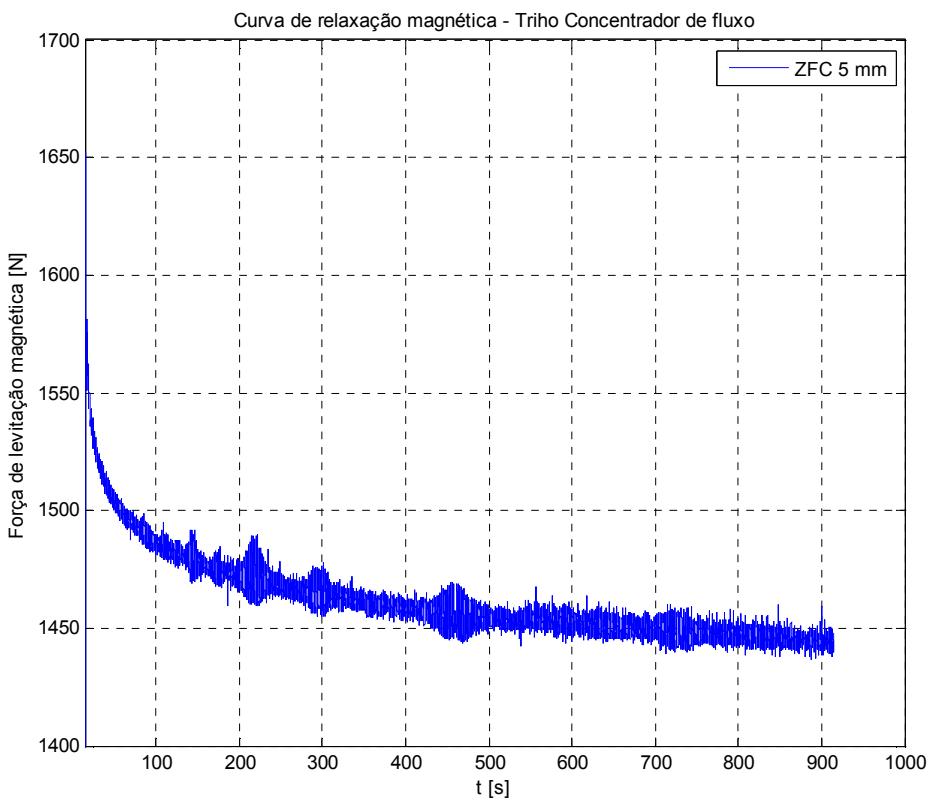


Figura 20: Medida da relaxação em ZFC: Concentrador de Fluxo.

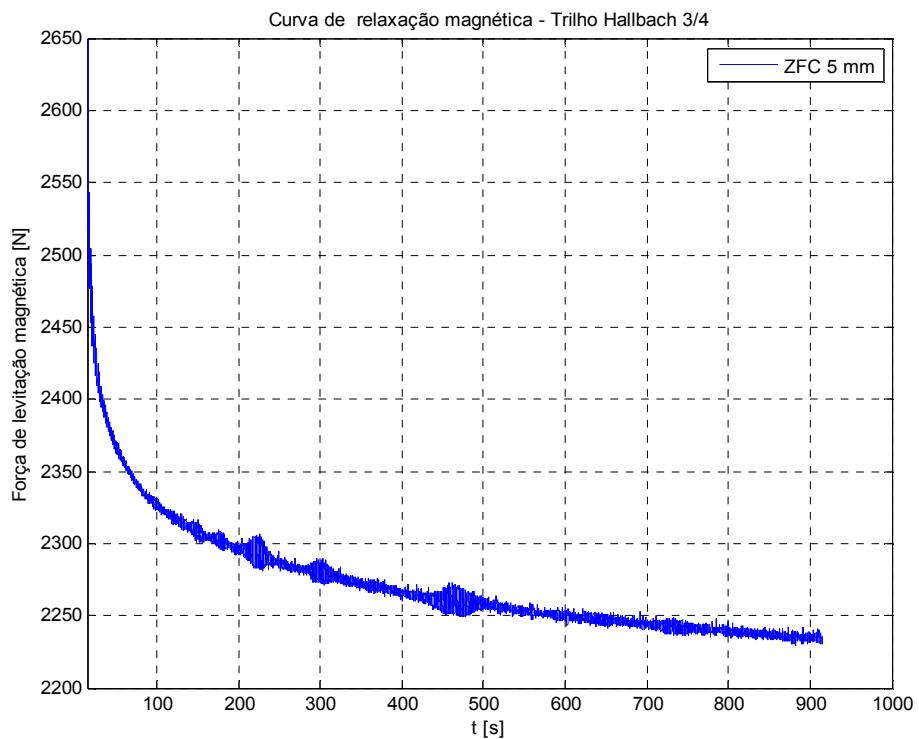


Figura 21: Medida da relaxação em ZFC: $\frac{3}{4}$ de Hallbach

6.2. Resultados e ensaios em FC

Para a execução das medidas em FC (*field cooling*), o criostato foi colocado em duas posições iniciais, de 30 mm e 35 mm, no qual há a presença do campo magnético sobre o supercondutor. Após o resfriamento o supercondutor é aproximado ao trilho magnético até uma altura mínima de 10 mm da superfície. Neste tipo de ensaio utilizaram-se diferentes velocidades de aproximação a fim de constatar o comportamento exponencial da força máxima de levitação. As velocidades utilizadas nas medidas foram: 0,13 mm/s, 1,25 mm/s e 10 mm/s.

6.2.1. Medidas realizadas com o trilho Concentrador de Fluxo

Conforme apresentado na literatura e discutido no capítulo 3, o efeito *flux creep* consiste num efeito termodinâmico. Desta forma pretende-se aqui investigar a variação da força de levitação magnética em um determinado tempo utilizando diferentes trilhos magnéticos. Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos com o trilho Concentrador de Fluxo.

Considerando a medida da relaxação magnética de caráter experimental, foi observado ao longo das medidas que o valor máximo da força de levitação, para uma mesma altura de resfriamento, está associada à velocidade de aproximação em que o supercondutor é submetido, como demonstrado no subcapítulo 3.2.

A curva de relaxação magnética pode ser vista na Figura 22. Verifica-se que a força de levitação máxima do criostato considerando uma altura inicial de 30 mm a velocidade de 0,13 mm/s é de 1112 N. Se compararmos esta medida em field cooling, mantendo a velocidade constante, com a medida realizada utilizando um altura inicial de 35 mm (Figura 23), observa-se que a força de levitação é de 1170 N. Este acréscimo na força pode ser atribuído a uma menor quantidade de fluxo magnético inicialmente. Por esse motivo, espera-se que o criostato, resfriado a uma distância inicial maior do trilho magnético, apresente uma força de levitação maior.

Outro aspecto importante a ser destacado na análise consiste no efeito da relaxação da força de levitação ao longo do tempo. Conforme pode ser observado na Figura 22, a força de levitação apresenta, percentualmente, um decaimento menor, quando comparado ao ensaio realizado para uma altura FC de 35 mm (Figura 23). Neste último, a força de levitação tende a 1064 N, quando percorridos aproximadamente 46.800 segundos (13 horas), o que corresponde a um decréscimo de

4,51% da força de levitação máxima. Em contrapartida, o ensaio realizado com FC de 30 mm apresenta um decréscimo percentual de 7,53% na força máxima de levitação para o mesmo período de tempo.

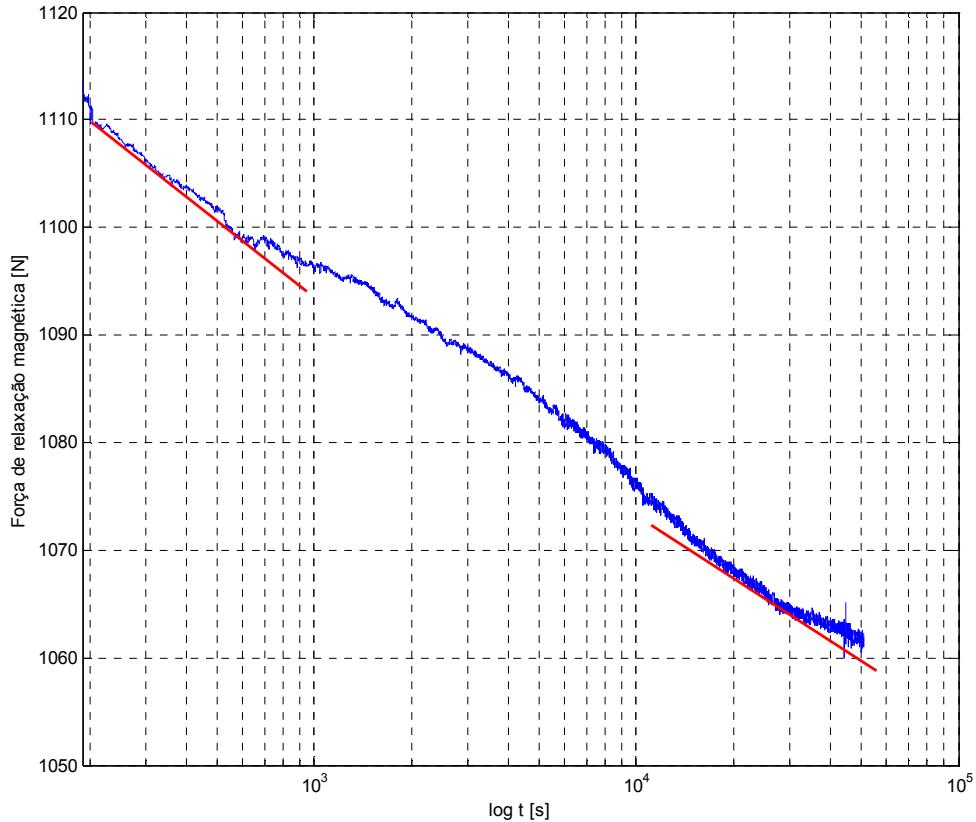


Figura 22: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 0,13 mm/s e FC a 30 mm

Vale ressaltar que a curva de relaxação magnética do supercondutor pode apresentar até três ângulos de inclinação diferentes, o que é relevante para análise do comportamento da força, pois permite fazer uma previsão do decaimento temporal mais preciso da força de levitação. É importante observar que, para algumas medidas obtidas, como por exemplo, na Figura 22, não é possível determinar todos os coeficientes angulares esperados. Como veremos mais adiante, outras curvas de relaxação também não se apresentaram idealmente ao comportamento descrito pelo modelo de Anderson-Kim, no qual a força de levitação possui dependência logarítmica com o tempo, apresentando algumas anomalias inesperadas. Uma possível explicação para este fenômeno é o fato do sensor de força (célula de carga) apresentar flutuações de tensão durante os experimentos realizados, seja pela eletrônica desenvolvida dentro do dispositivo de medição, seja pelo recurso tecnológico do *Matlab*, que não permitiu analisar todos os sinais, haja visto que este

possui um buffer máximo para aquisição de dados.

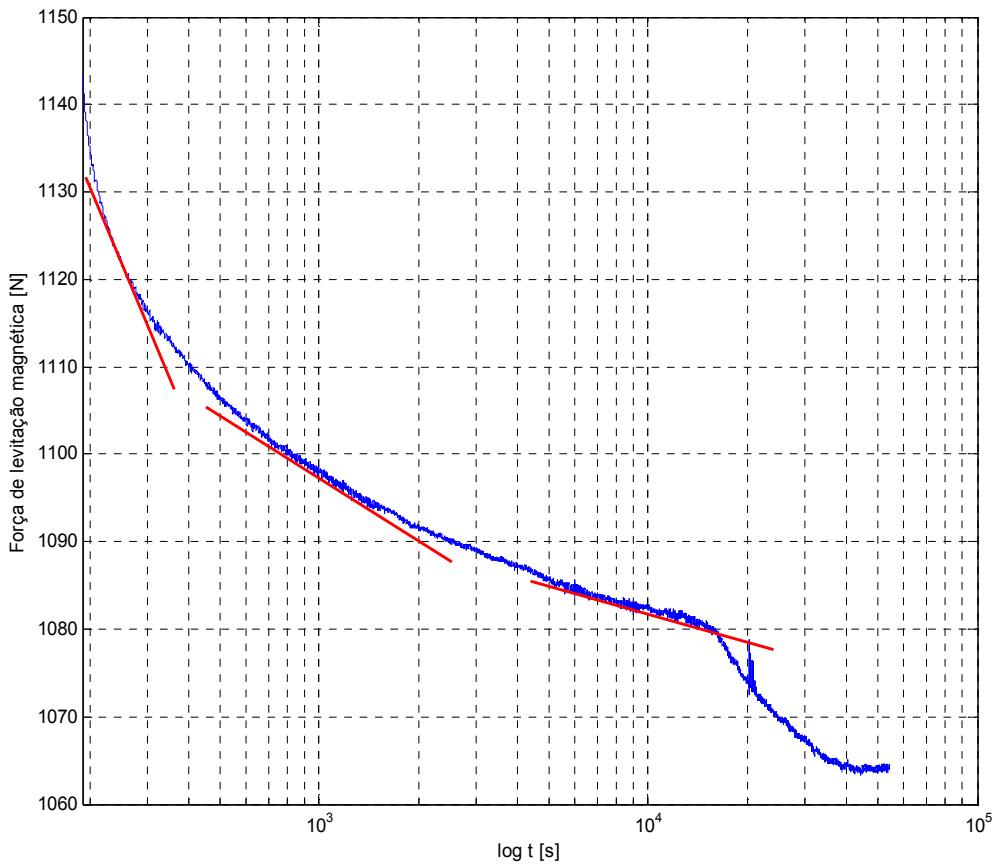


Figura 23: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 0,13 mm/s e FC a 35 mm

Independentemente dos problemas encontrados ao longo das medidas realizadas, para um primeiro entendimento do comportamento termodinâmico da relaxação magnética, o sistema de medidas mostrou-se bastante satisfatório e eficaz em relação aos valores obtidos. Como pode ser visto na Figura 23, no instante de tempo de 15.000 segundos, há um decaimento abrupto inesperado da força de levitação. O motivo para a redução da força, como iremos investigar mais adiante é devido à célula de carga apresentar um *drift* de tensão. Porém, caso seja desconsiderado este decaimento abrupto da força, verifica-se que o gráfico possui a tendência de uma inclinação quase nula à medida que o tempo aumenta. Ou seja, a partir da última inclinação, a força de levitação magnética tende a reduzir menos conforme o tempo se desenvolve.

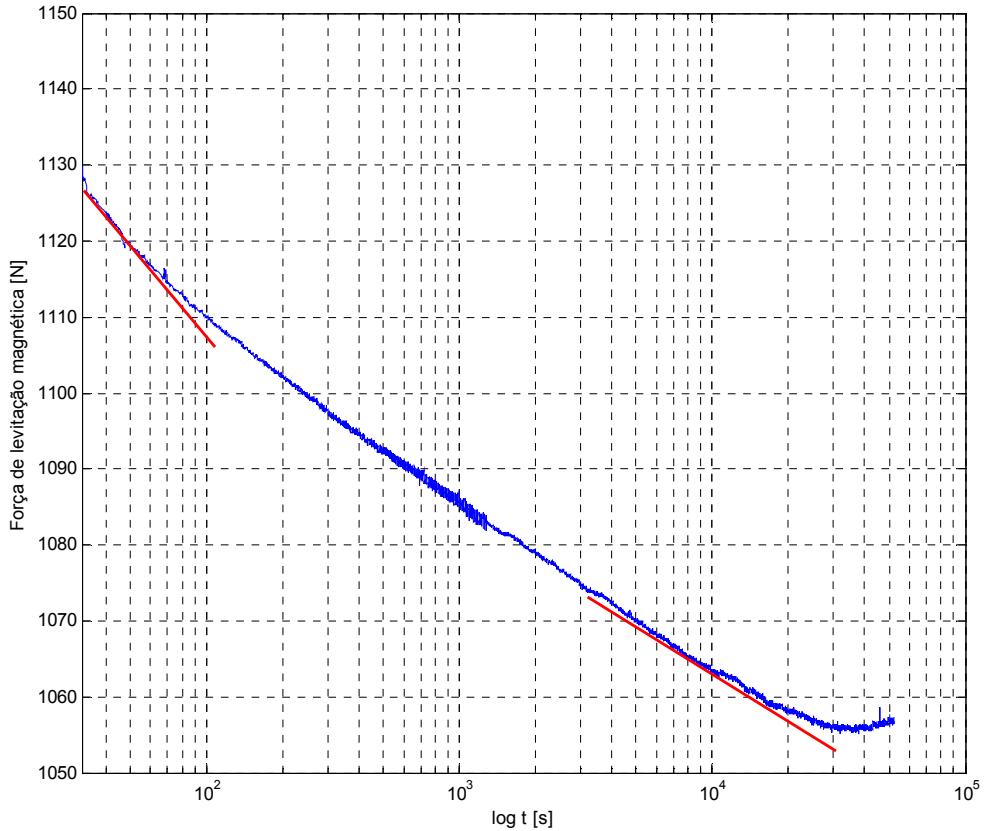


Figura 24: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 1,25 mm/s e FC a 30 mm.

Dando prosseguimento a análise do efeito *flux creep*, conclui-se que a força de levitação é proporcional à velocidade com que o supercondutor é submetido. Esta afirmação justifica-se claramente ao verificar, através da Figura 24, que mantendo-se a altura FC constante e aumentando a velocidade do supercondutor ao trilho, maior será a força de levitação inicial. Contudo, vale ressaltar uma maior relaxação magnética para velocidades cada vez maiores (Figura 24), em torno de 1055 N, o que corresponde ao decréscimo de 8,8% da força máxima inicial.

Na Figura 25, o comportamento da força possui decaimento logarítmico maior quando comparado ao da Figura 24, o que era de ser esperado para uma altura inicial de 35 mm. Quando percorridos aproximadamente 29.000 segundos de transição do estado supercondutor, a força tende a manter sua estabilidade no valor de 1150 N. Portanto, verifica-se uma redução da força correspondente a 11,82% da força de levitação magnética inicial. Como esperado, a tendência do ângulo de inclinação da curva de relaxação ser nulo para um intervalo de tempo maior permite realizar a previsão de qual será a magnitude da força magnética ao longo de um determinado período de tempo.

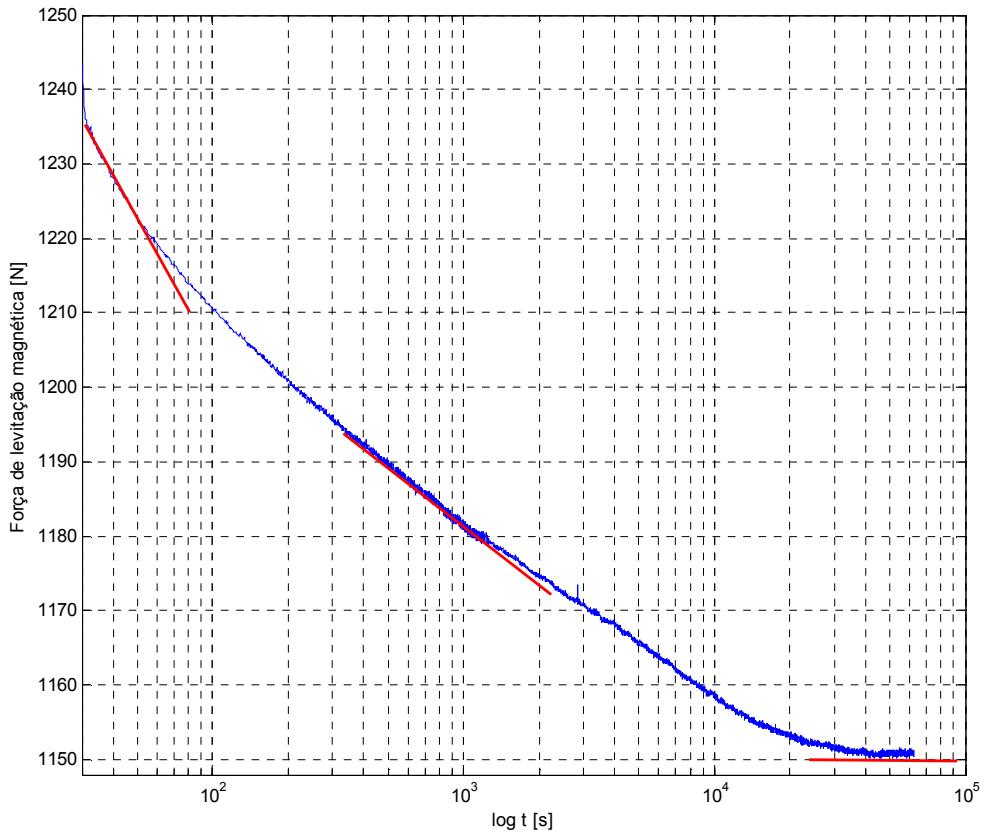


Figura 25: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 1,25 mm/s e FC a 35 mm.

Na Figura 26, novamente verifica-se um decaimento maior da força à medida que a velocidade de aproximação do trilho ao supercondutor aumenta. Se compararmos os resultados obtidos ao gráfico da Figura 27, verifica-se que o taxa de decaimento da relaxação magnética é superior quando a altura inicial é de 35 mm, o que era de ser esperado. Quantitativamente, a redução da força de relaxação para uma altura FC de 30 mm é de 13,58%, enquanto que para uma altura de 35 mm, o decaimento exponencial corresponde a um decréscimo de 14,48%, reforçando a afirmação de que o comportamento magnético está relacionado tanto a velocidade de aproximação e a altura em que o supercondutor está posicionado em relação ao trilho magnético.

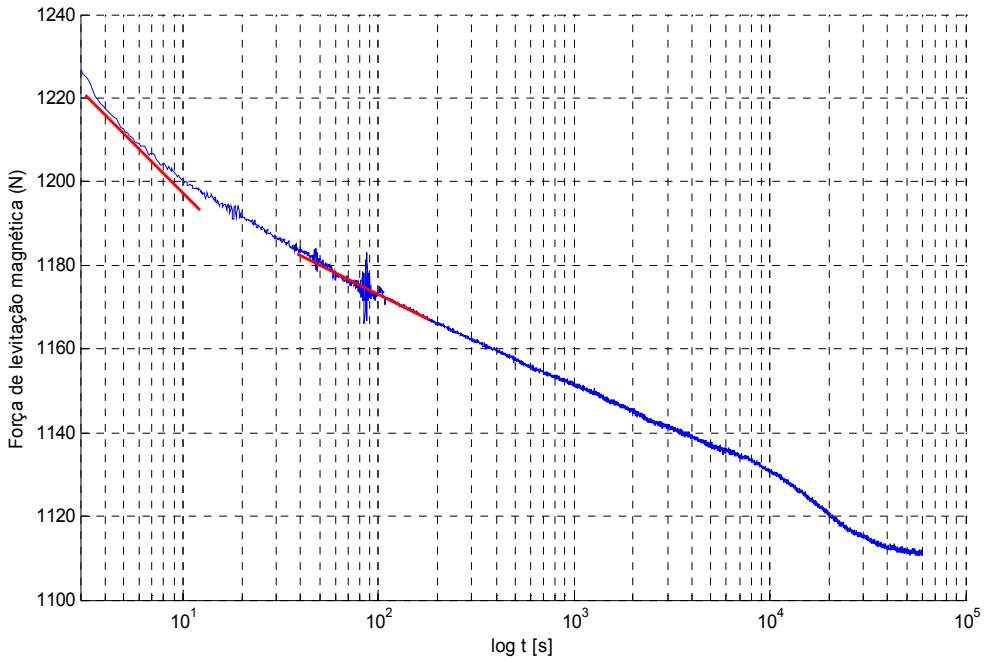


Figura 26: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 10 mm/s e FC a 30 mm.

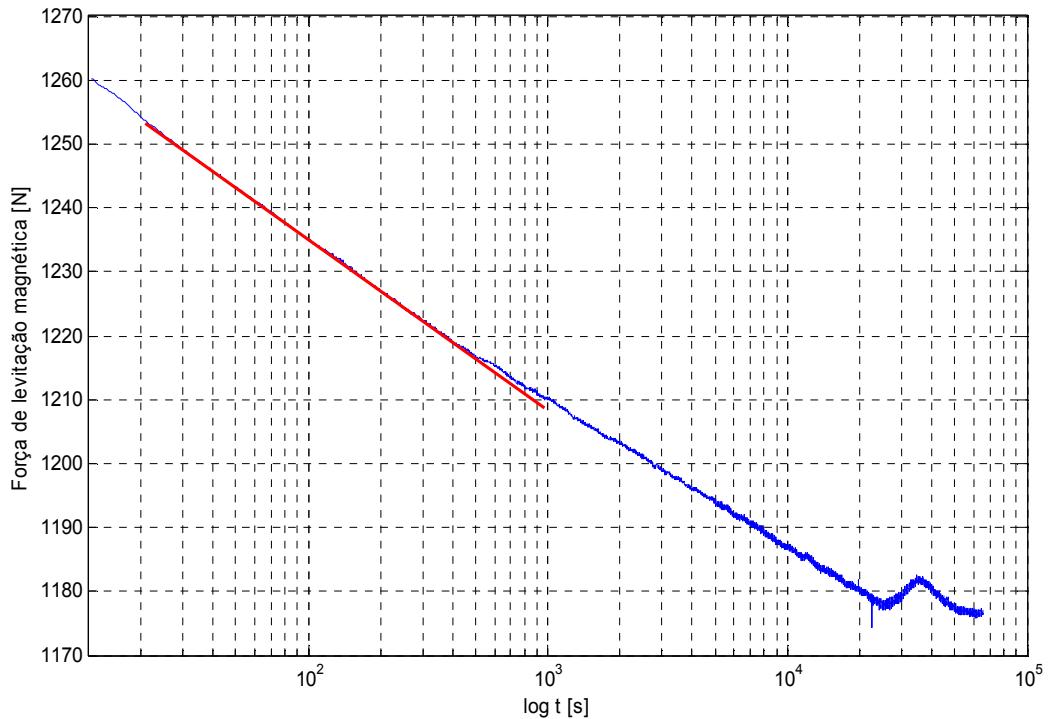


Figura 27: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 10 mm/s e FC a 35 mm.

Conforme pode ser observado na Figura 26, no instante de tempo de 100 segundos, o sinal aquisitado durante a medida contém níveis de ruído que, teoricamente, não é relevante à análise final da curva de relaxação magnética. Porém, vale ressaltar que é importante que o circuito de

medição e instrumentação seja imune a ruídos ou interferências que possam comprometer a medida do sistema. A Figura 27 mostra que, após um período de tempo de 25.000 segundos, a força de levitação eleva e diminui abruptamente sua magnitude. Este problema é proveniente do erro de medida da célula de carga conforme descrito anteriormente. Observa-se que para esta curva de relaxação, a força de levitação tende a se estabilizar em 1175 N, o que corresponde a um decréscimo de 14% de seu valor máximo.

Tendo em vista as medidas realizadas para esta configuração de fluxo magnético, é possível constatar o efeito de diferentes velocidades de aproximação. A Figura 28 mostra os resultados obtidos considerando-se três diferentes valores de velocidade. Em virtude da lei construtiva E-J, dada pela equação 3.2.4, conclui-se que, conforme a velocidade aumenta, o campo elétrico induzido também aumenta, e os vórtices no supercondutor terão menos tempo para relaxar. Dessa forma, a força máxima de levitação irá aumentar conforme a velocidade aumenta. Pode-se observar que o modelo apresenta uma dependência logarítmica entre a força máxima de levitação e a velocidade de aproximação entre o ímã e o supercondutor.

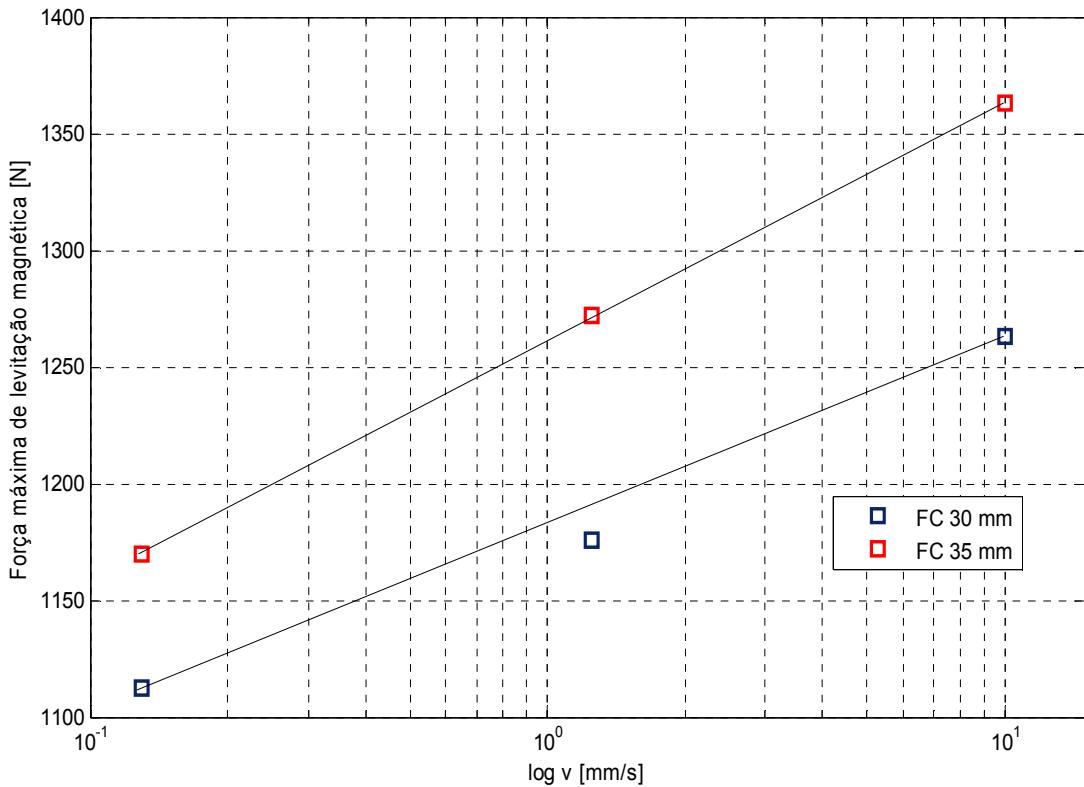


Figura 28: Medidas da força de levitação magnética para diferentes velocidades de aproximação. O gap final de todas as curvas é de 10 mm, configuração Concentrador de Fluxo.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se inferir que dada uma velocidade de aproximação, quanto maior a distância entre o criostato e o trilho magnético, maior será a força de levitação máxima, porém, o decaimento temporal do efeito da relaxação aumenta.

6.2.2. Medidas realizadas com o trilho $\frac{3}{4}$ de Hallbach

Para estas medidas será utilizado o trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach, conforme explicado no capítulo 4. Dando prosseguimento à análise do efeito *flux creep*, para a execução das medidas, o criostato foi posicionado em uma altura *field cooling* de 35 mm, e por seguite, aproximando-o ao trilho magnético a uma altura mínima (gap) de 10 mm da superfície. Novamente, utilizou-se diferentes velocidades de aproximação a fim de constatar o decaimento logarítmico da força de levitação magnética presente nos mancais supercondutores. As velocidades utilizadas nas medidas foram conservadas em: 0,13 mm/s, 1,25 mm/s e 10 mm/s.

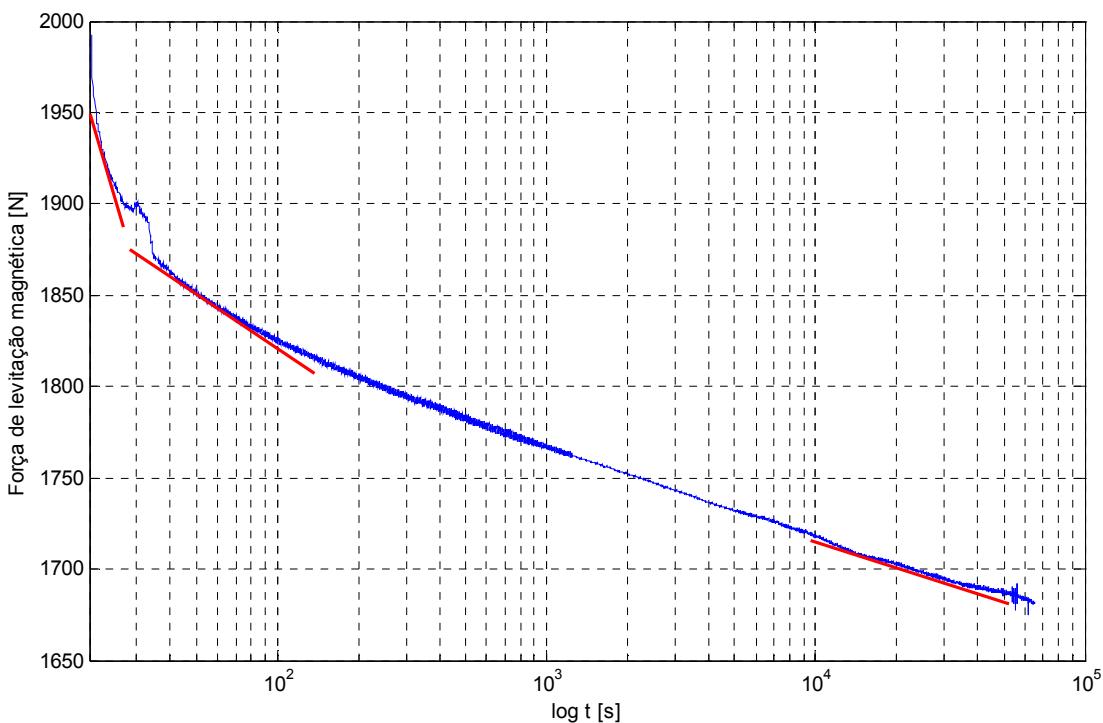


Figura 29: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 0,13 mm/s e FC a 35 mm, configuração $\frac{3}{4}$ de Hallbach.

Como pode ser observado na Figura 29, a força de levitação máxima é menor quando o mancal linear é submetido a velocidades de aproximação cada vez menores. Em contrapartida, a Figura 30 permite avaliar o efeito *flux creep* no supercondutor com característica predominante dos

três ângulos de inclinação presentes na curva da relaxação. É relevante mencionar que após um determinado tempo, a inclinação tende a se estabilizar, fazendo com que a variação da força seja mínima a partir deste instante de tempo.

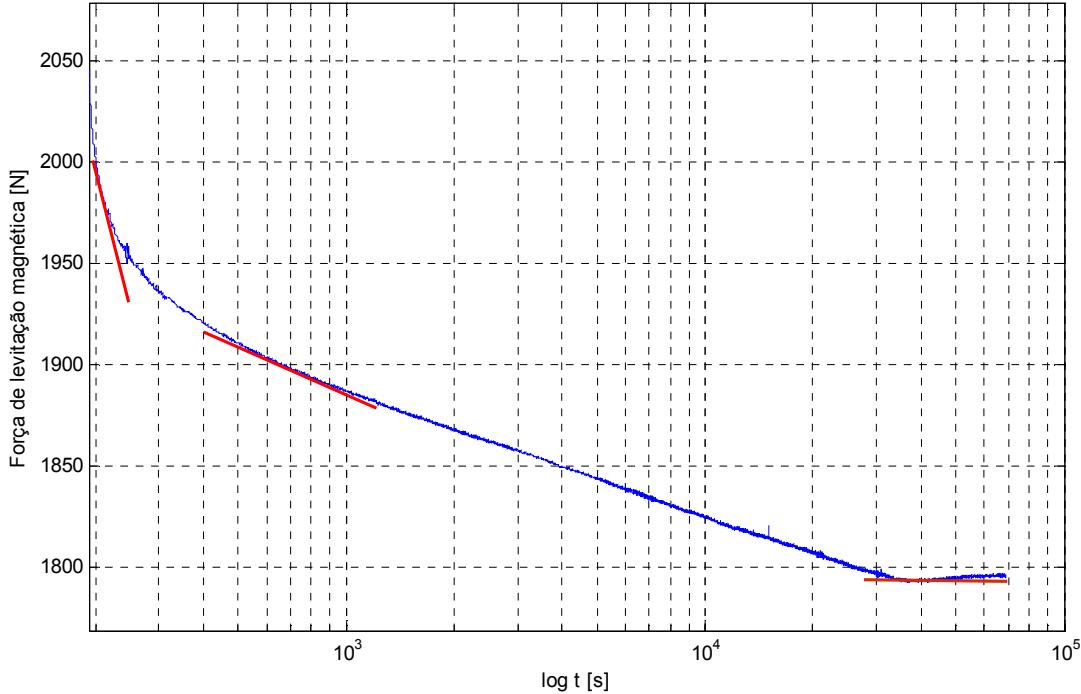


Figura 30: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 1,25 mm/s e FC a 35 mm, configuração $\frac{3}{4}$ de Hallbach.

Uma análise similar do decaimento temporal da força de levitação pode ser verificada na Figura 31, no qual a imposição de velocidades maiores de aproximação resultam em um menor período de tempo em que os vórtices relaxam fazendo com que a força de levitação máxima seja maior. Observa-se também a queda abrupta da força de levitação durante o ensaio em virtude da flutuação de tensão na célula de carga, como será explicado na seção 6.3. A Figura 32 mostra os resultados obtidos considerando-se três diferentes valores de velocidade. Pode-se observar que o modelo apresenta uma dependência logarítmica entre a força máxima de levitação e a velocidade de aproximação entre o ímã e o supercondutor. Dessa forma, a força máxima de levitação irá aumentar conforme a velocidade aumenta.

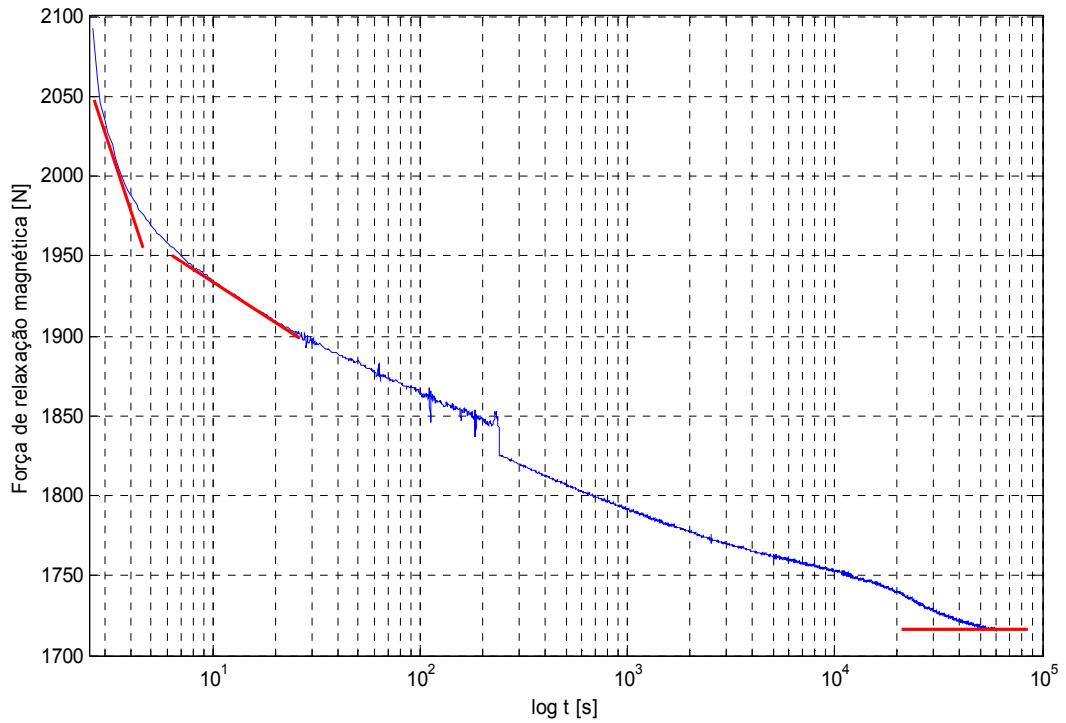


Figura 31: Curva de relaxação magnética com velocidade de aproximação de 10 mm/s e FC a 35 mm, configuração ¾ de Hallbach.

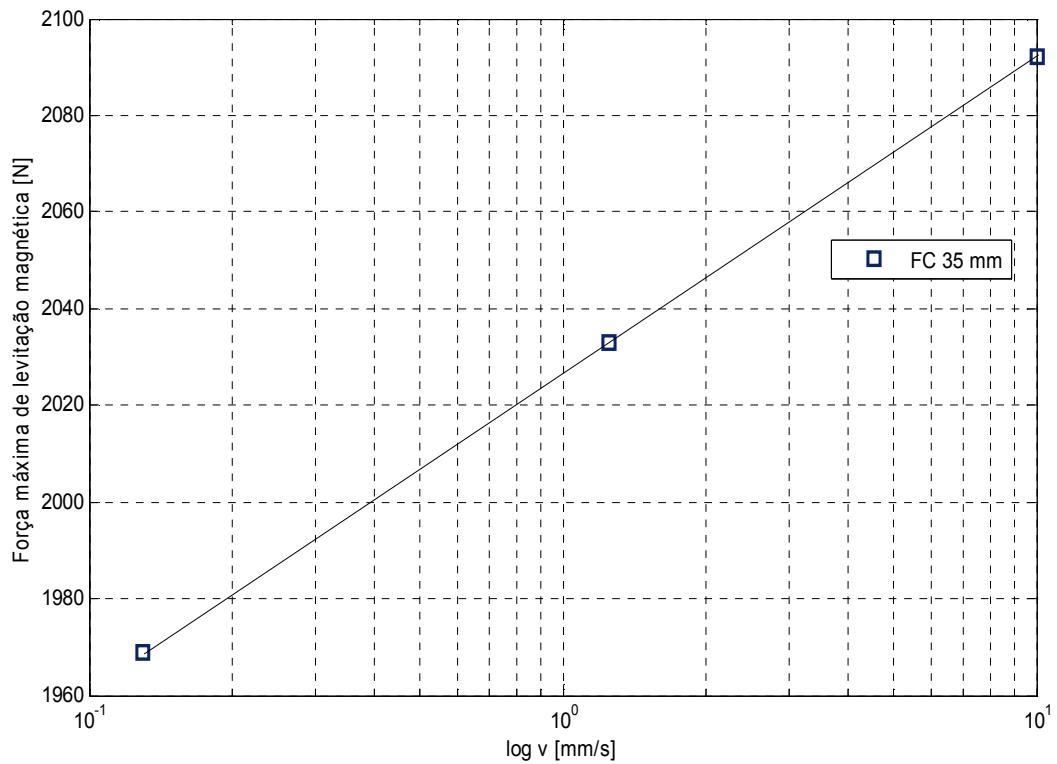


Figura 32: Medidas da força máxima de levitação magnética para diferentes velocidades de aproximação. O gap final de todas as curvas é de 10 mm, configuração ¾ de Hallbach.

Na Tabela 2 é mostrado um quadro comparativo entre diversas velocidades de aproximação do supercondutor para diferentes configurações de trilho magnético, comprovando os resultados obtidos durante as medidas realizadas, considerando as alturas (*field cooling* – FC) utilizadas no sistemas de medidas.

Tabela 2: Tabela comparativa entre a força de levitação máxima para diferentes velocidades e alturas iniciais. O gap é de 10 mm.

FORÇA DE MÁXIMA DE LEVITAÇÃO (N)	VELOCIDADE DE APROXIMAÇÃO (mm/s)	TRILHO MAGNÉTICO	ALTURA FC (mm)	FORÇA FINAL DE LEVITAÇÃO (N)	TAXA DE DECAIMENTO DA FORÇA (%)
1112	0,1302	<i>CONCENTRADOR DE FLUXO (CF)</i>	30	1064	4,51
1176	1,25			1080	8,8
1263	10			1112	13,58
1170	0,1302		35	1088	7,53
1272	1,25			1138	11,82
1363	10			1196	14
1969	0,1302	<i>¾ DE HALLBACH</i>	35	1767	11,45
2033	1,25			1790	13,54
2092	10			1717	21,84

6.3. Medidas de flutuação da força de levitação magnética

A fim de investigar a causa referente às anomalias inesperadas da leitura da força de levitação magnética causada pela célula de carga, foi feita a medida somente desta célula sem a presença do criostato. Tal medida constitui em aplicarmos uma força constante (Figura 33(c)) ao longo do tempo com objetivo de observar possíveis flutuações de tensão presentes na célula, cujos resultados estão mostrados na Figura 33(a) e 33(b).

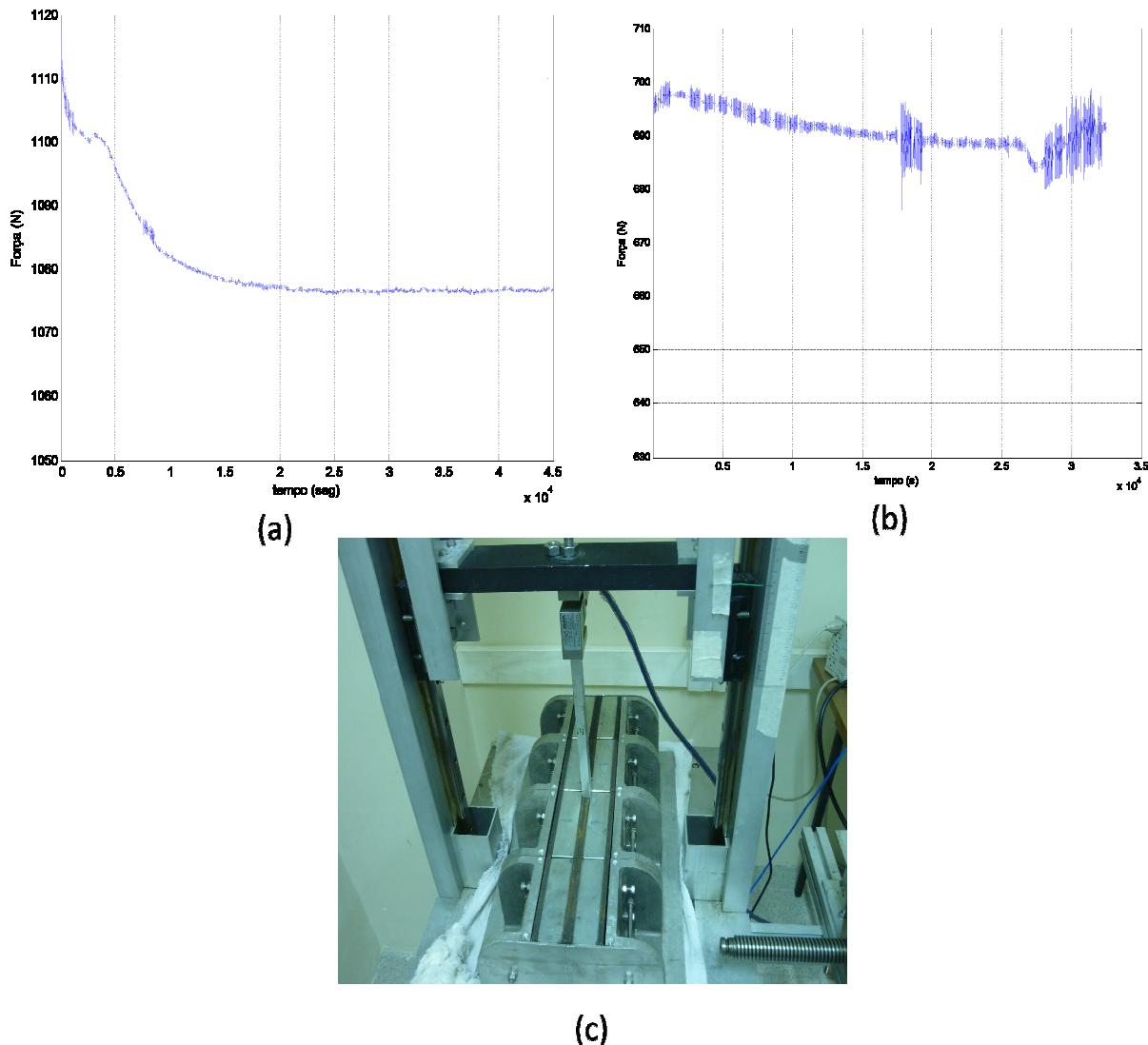


Figura 33: Em (a) e (b) Anomalias da força constante exercida sobre a célula de carga e (c) Sistema de medidas utilizando apenas a célula submetida à força vertical constante

De acordo com os gráficos da Figura 33(a) e 33(b), esperava-se que a força exercida sobre a célula de carga se comportasse de maneira constante durante o período de tempo da amostra. Porém, observa-se variações nos valores de força ocorrendo em instante de tempo semelhante às medidas anteriores (18.000 segundos). Na Figura 33(a), verifica-se um decréscimo da força em 35 N, o que corresponde a 2,35% da força inicialmente exercida. Logo, em decorrência da análise, explica-se a queda abrupta da força de levitação durante as medidas realizadas sendo causada pela eletrônica que compõe o circuito da célula de carga.

Capítulo VII - Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho consistiu em investigar a relaxação da força de levitação magnética em mancais lineares supercondutores, considerando o resfriamento na ausência (*zero field cooling - ZFC*) e presença (*field cooling - FC*) de campo magnético. A medida de relaxação de fluxo magnético (*flux creep*) permitiu avaliar o decaimento exponencial da força de levitação em função do tempo de um mancal supercondutor aplicado a um veículo supercondutor. Os resultados obtidos foram satisfatórios de acordo com os objetivos idealizados inicialmente.

A proposta para o estudo da relaxação magnética de um mancal linear supercondutor, composto por um supercondutor e um trilho magnético de ímãs permanentes, cujas características foram apresentadas no capítulo 4, será de grande valia para o desenvolvimento de veículos de levitação magnética. Os resultados obtidos durante os ensaios permitem determinar os ângulos de inclinação da curva de relaxação a fim de determinar o decaimento exponencial e a realizar a previsão de qual será a força de levitação em um determinado tempo, o qual deve ser levado em consideração na elaboração do projeto.

As medidas foram executadas utilizando-se supercondutores do tipo II, presentes na maioria das aplicações práticas, e que permite o aprisionamento de fluxo magnético. 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) em virtude da interação entre o criostato e o trilho magnético.

Para análise das medidas de relaxação magnética, utilizaram-se duas configurações de trilho magnético: Concentrador de fluxo e $\frac{3}{4}$ de Hallbach. A diferença entre os trilhos consiste na intensidade de fluxo magnético aprisionado com a utilização de uma seção de área menor, no qual observou-se que a configuração do trilho magnético $\frac{3}{4}$ de Hallbach teve uma maximização da força de levitação como apresentado no capítulo 6.

A grande dificuldade para as medidas de relaxação magnética foi devido à utilização da célula de carga que, apesar dos valores obtidos estarem de acordo com o objetivo deste trabalho, foi observado flutuações de tensão no sensor de força, o que ocasiona erro na medida de força entre o trilho e o criostato. Não se sabe ao certo o motivo desta inconsistência, porém, trabalhos futuros serão desenvolvidos com o intuito de prover melhorias no sistema de medidas, bem como uma melhor acurácia do efeito *flux creep* na força de levitação dos mancais supercondutores.

As medidas mostraram-se satisfatórias para a determinação da força de levitação tanto para o processo de resfriamento na presença (*field cooling* - FC) e ausência de campo (*zero field cooling* – ZFC). Observou-se que a utilização de mancais de geometria complexa tem uma relaxação logarítmica da força de levitação com o tempo, o que permite concluir que esta relaxação da força de levitação do mancal do trem Maglev-Cobra pode ser descrita pelo modelo de Anderson-Kim.

Outra contribuição deste trabalho é com relação ao tipo de configuração que deve ser utilizada para a construção de um trilho de ímãs permanentes. Tendo em vista um maior valor da força de levitação para o trilho do tipo $\frac{3}{4}$ de Hallbach em relação ao tipo CF, o primeiro deve ser utilizado como base para a determinação de uma configuração ótima de trilho magnético a ser utilizado para o desenvolvimento de um protótipo de trem de levitação magnética supercondutora (Maglev).

Capítulo VIII - Referências

- [1] DIAS, D. H. N. et al. The Flux Creep Effect in Superconducting Magnetic Bearings Levitation Force. **Journal of Physics: Conference Series Vol. 97, Conf.1**, 2007.
- [2] STEPHAN, R. M. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: Uma quebra de paradigma no transporte de massa do século XXI. **CONINFRA 2010 – 4º CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2010 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE)**, 4th to 6th August 2010. 1-6.
- [3] FERREIRA, P. V. A. et al. Implementação de um sistema de caracterização de mancais magnéticos supercondutores. **XVI Congresso Brasileiro de Automática**, 2006. 2531-2535.
- [4] MOTTA, E. S. Simulação Termo-eletromagnética de Tubo Supercondutor para um Limitador de Corrente. **Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ**, Março 2007. 39-41.
- [5] KATSURA, S. Statistical Mechanics of the Anisotropic Linear Heisenberg Model. **Phys. Rev. 127**, 1962. 1508-1518.
- [6] SOTELO, G. G. MODELAGEM DE SUPERCONDUTORES APLICADA AO PROJETO DE MANCAIS MAGNÉTICOS. **Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ**, Maio 2007. 27-30.
- [7] RIBEIRO, R. D. A. Estudos de Relaxação Magnética em Supercondutores do Tipo-II. **Tese de Doutorado, UNICAMP/SP**, Julho 2001. 25-30.
- [8] LUIZ, A. M. **Aplicações da Supercondutividade**. São Paulo : Edgard Blucher Ltda, 1992.
- [9] COPPE-UFRJ. **PLANETA COPPE**, 13 Agosto 2007. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=891>>. Acesso em 27 maio 2010.
- [10] ANDERSON, P. W.; KIM, Y. B. Hard Superconductivity: Theory of the Motion of Abrikosov Flux Lines. **Rev. Mod. Phys. 36**, 1964. 39-43.
- [11] BEASLEY, M. R.; LABUSCH, R.; WEBB, W. W. Flux Creep in Type-II Superconductors. **Phys. Rev. 181**, 1969. 682.

[12] SOTELO, G. G. et al. Projeto de trilhos magnéticos para o veículo Maglev Cobra.

Resumo dos resultados obtidos no período de dezembro de 2008 a dezembro de 2009 para o projeto Maglev Cobra, 2008-2009. 1-15.

[13] ADVANTECH. **User's Manual. PCI-1711 Series**, 1 June 2001.

[14] ELETRIC, S. **Instructions, SLO-SYN® MD808 & MD808-128 Microstep Drive Module Installation**, 12 Junho 2010.

[15] MOYSÉS, A. L.; MACHADO, W. S. **A SUPERCONDUTIVIDADE E SUAS APLICAÇÕES: UM TEMA PARA AULAS DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO**. XVI Simpósio Nacional de Física. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2005. p. 1-4.

[16] BORDIN, G. C. Medida de força de levitação magnética de mancais magnéticos. **Projeto de graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ**, Setembro 2006.

[17] WIKIPEDIA. JR-Maglev. **Wikipédia, a enciclopédia livre**, 2010. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/JR-Maglev>>. Acesso em 21 maio 2010.

[18] FERREIRA, P. V. A. Automação de um sistema de medidas de força de levitação magnética. **Projeto fim de curso em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro**, 2008.

[19] DIAS, D. H. N. et al. Implementação de um sistema de medidas de força e torque magnético em mancais lineares supercondutores. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, 2010. 1-5.

[20] DIAS, D. H. N. Modelagem de mancais lineares supercondutores considerando o resfriamento na presença de campo magnético. **Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ**, Agosto 2009. 44-51.

[21] FITZGERALD, A. E.; JR., C. K.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6^a. ed. São Paulo: McGraw do Brasil, LTDA, v. VI, 2006. Cap. 8, p. 418-425.

[22] Abrikosov, A. A. **Fundamentals of the theory of metals**, Amsteram: North-Holland, 1988. 120-135.