



MANCAL MAGNÉTICO SUPERCONDUTOR
COM LAÇOS DE FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Flávio Goulart dos Reis Martins

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Rubens de Andrade Junior
Antonio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro
Maio de 2018

MANCAL MAGNÉTICO SUPERCONDUTOR
COM LAÇOS DE FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Flávio Goulart dos Reis Martins

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Rubens de Andrade Junior, D. Sc.

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

Prof. Durval Rodrigues Junior, D. Sc.

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, D. Sc.

Prof. José Albino Oliveira de Aguiar, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2018

Martins, Flávio Goulart dos Reis

Mancal Magnético Supercondutor com Laços de Fitas de Segunda Geração/ Flávio Goulart dos Reis Martins. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIV, 100 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Rubens de Andrade Junior

Antonio Carlos Ferreira

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 82-87.

1. Fitas supercondutoras. 2. Mancais Magnéticos Supercondutores. I. Andrade Junior, Rubens de, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

MANCAL MAGNÉTICO SUPERCONDUTOR
COM LAÇOS DE FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Flávio Goulart dos Reis Martins

Maio / 2018

Orientadores: Rubens de Andrade Junior
Antonio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Esta tese de doutorado tem por objetivo apresentar uma nova concepção de bobinas de fitas supercondutoras de segunda geração na forma de laços de correntes persistentes, chamados Laços Duplos Cruzados. Neste trabalho, propõe-se utilizá-las no novo sistema de levitação para o veículo MagLev Cobra. Foi desenvolvida uma modelagem utilizando Equações Integrais calculadas pelo método de elementos finitos no software comercial COMSOL. Também se propõe um procedimento para fabricação artesanal destas bobinas, partindo desde seu desenho, preparação das fitas até a impregnação. Protótipos de pequena escala foram construídos e analisados experimentalmente com ensaios de força vertical para validação dos resultados de simulação. Além disso, os resultados experimentais foram comparados aos do sistema de levitação utilizado atualmente. Os protótipos desenvolveram forças comparáveis às do sistema de levitação existente, levando à conclusão de que a nova geometria de bobina proposta, o modelo de simulação e a técnica de fabricação foram bem sucedidos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D. Sc.)

SUPERCONDUCTING MAGNETIC BEARING
WITH LOOPS OF SECOND GENERATION WIRES

Flávio Goulart dos Reis Martins

May / 2018

Advisors: Rubens de Andrade Junior
Antonio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

This thesis aims to demonstrate a novel design of superconducting coils using second generation tapes as persistent currents loops, called the Double Crossed Loops. In this work it is proposed to use them in the new levitation system for the MagLev Cobra vehicle. A simulation model using Integral Equations solved by finite elements in commercial software COMSOL was developed. Also a manufacturing procedure for these coils is proposed, from their design, preparation until impregnation. Small scale prototypes were built and experimentally analyzed by vertical force measurements to validate the simulations results. In addition, experimental results were compared to the present levitation system. The prototypes have presented forces comparable to the existing levitation system, leading to the conclusion that the novel coil design, the simulation model and manufacturing technique were successful.

Sumário

Sumário.....	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas.....	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivações.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Organização do Texto	2
2 Teoria de Supercondutividade.....	3
2.1 Breve Histórico	3
2.2 Aprisionamento de Fluxo Magnético.....	7
2.3 Dinâmica de Vórtices e Corrente Crítica.....	10
2.4 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	13
2.5 Fitas Supercondutoras	14
2.6 Dependência da Corrente Crítica com o Campo Magnético.....	16
3 Contextualização do Trabalho.....	20
3.1 Mancais Magnéticos.....	20
3.2 Mancais Magnéticos Supercondutores.....	20
3.2.1 Armazenadores de Energia Cinética.....	21
3.2.2 Veículos de Levitação Magnética.....	22
3.3 O Veículo Maglev Cobra	23
3.3.1 Mancais Magnéticos do Maglev Cobra	24
3.4 Mancais de Fitas Empilhadas	26
3.5 Laços de Fitas 2G	29
4 Metodologia.....	30
4.1 Limitações do Atual Sistema de Levitação do MagLev Cobra.....	30
4.2 O Projeto de um Novo Mancal Magnético Supercondutor: Laços Duplos Cruzados de Fitas 2G.....	31
4.3 Modelagem da Dependência Anisotrópica da Corrente Crítica do Supercondutor com o Campo Magnético.....	33
4.3.1 Caracterização da Fita 2G.....	33
4.3.2 Formulação do Problema pelo Método das Equações Integrais.....	37
4.4 Abordagem do Problema no COMSOL	40
4.5 Projeto e Montagem dos Laços Duplos Cruzados	43

4.6	Testes de Força de Levitação	44
5	Resultados	46
5.1	Prova de conceito	46
5.2	Simulação dos Mancais Magnéticos Supercondutores	48
5.2.1	Parâmetros da Simulação	49
5.2.2	Evolução da Estratégia de Simulação.....	51
5.2.3	Resultados das Simulações	55
5.3	Processo de Fabricação das Bobinas	60
5.3.1	Corte das Fitas.....	60
5.3.2	Amarra e esqueleto da bobina	62
5.3.3	Fabricação do Molde	63
5.3.4	Montagem da bobina	64
5.3.5	Impregnação	64
5.4	Bobinas de LDCs Finalizadas	66
5.5	Testes de Força de Levitação	67
5.5.1	Testes de Caracterização das Bobinas.....	68
5.5.2	Testes Estáticos de Força: ZFC e FC a 50 mm.....	69
5.5.3	Testes Dinâmicos de Decaimento de Força	74
5.5.4	Testes de Força com as Bobinas Perpendiculares ao Trilho	76
5.6	Considerações Finais	78
6	Conclusões	79
6.1	Trabalhos futuros:.....	80
	Referências Bibliográficas	82
	Apêndice	88
	Evolução do Processo de Fabricação das Bobinas.....	88
	Anexos	97
	A. Ficha Técnica da borracha líquida de silicone utilizada na fabricação do molde vasado para as bobinas	97
	B. Ficha Técnica do metal de Wood utilizada na impregnação das bobinas.....	99

Lista de Figuras

Figura 2.1. Região do espaço T-H-J onde o estado supercondutor é possível, com destaque para os limites críticos de um supercondutor do tipo II.	4
Figura 2.2. Elementos puros que apresentam o estado supercondutor [4-6].	6
Figura 2.3. Diferenças entre os supercondutores de Tipos I e II com relação ao campo magnético [8].	7
Figura 2.4. Rede de Abrikosov em um supercondutor do Tipo II.	8
Figura 2.5. Esquema de como o campo aprisionado num supercondutor hipotético submetido a FC impõe uma força restaurativa em resposta à modificação da posição original.	9
Figura 2.6. Exemplo de um ímã permanente levitando sobre uma pastilha de supercondutor em banho de nitrogênio líquido.	9
Figura 2.7. Indução da Força de Lorentz sobre um fluxóide.	10
Figura 2.8. Comportamento da Curva E-J nas redondezas de J_c (a) e até a completa transição ao estado normal com destaque para as etapas do processo em escala Log (b). Adaptado de [17].	12
Figura 2.9. Exemplo de Flux Creep na força de levitação entre um ímã permanente e um supercondutor hipotético submetido a FC e aproximado 30 mm a 1 mm/s.	13
Figura 2.10. Medida da dependência angular da corrente crítica com campo magnético para uma fita de REBCO. Adaptada de [19].	15
Figura 2.11. Estrutura cristalina do YBCO com destaque para os planos de óxido de cobre. Adaptado de [17].	16
Figura 2.12. Esquema didático da simulação (a), corrente imposta na fita supercondutora (b), e densidade de corrente com J_c constante (c) e dependente do campo magnético (d). As curvas (c) e (d) são coloridas de acordo com o tempo de simulação mostrado em (b). Fonte: o próprio autor.	17
Figura 3.1. Exemplos de arranjos de ímãs permanentes usados em mancais magnéticos supercondutores	21
Figura 3.2. Via elevada e veículo do protótipo operacional do Maglev Cobra na Cidade Universitária da UFRJ	24
Figura 3.3. Criostato instalado no Maglev Cobra em levitação sobre o trilho de ímãs permanentes.	24
Figura 3.4. Desenho esquemático com dimensões do trilho de ímãs permanentes do Maglev Cobra (adaptado de [60])	25
Figura 3.5. Criostatos na parte inferior do Maglev Cobra.	25
Figura 3.6. Esquema do corte transversal de um criostato do Maglev Cobra.	26

Figura 3.7. Mancal supercondutor radial bobinas de Fitas 2G. Adaptado de [64].	27
Figura 3.8. Mancal magnético supercondutor radial de Fitas 2G empilhadas. Adaptado de [68].	28
Figura 3.9. Laços de Fitas 2G. Adaptado de [69].	29
Figura 4.1. Assimetria e espaço não aproveitado em laços de Fitas 2G.	31
Figura 4.2. Esquema de bobina de dois laços duplos cruzados de Fita 2G.	32
Figura 4.3. Esquema do sistema de caracterização de Fita 2G em campo magnético [70].	35
Figura 4.4. Posicionamento do porta-amostra no eletroímã.	35
Figura 4.5. Esquema com detalhes do porta-amostra com uma amostra de Fita 2G.	36
Figura 4.6. Densidade de corrente J_z na sessão transversal de uma Fita 2G (a) pode ser interpretada como uma densidade laminar de corrente K_z (b). Fonte: O próprio autor.	38
Figura 4.7. Campo magnético H_{prop} expresso por lâminas de corrente de largura diferencial.	38
Figura 4.8. Abordagem da simulação de um mancal de dois LDCs para resolver a densidade laminar de corrente K_z em cada fita supercondutora.	41
Figura 4.9. Esquema da simulação da sessão reta de um mancal de três LDCs ($N = 3$) com os principais parâmetros da geometria destacados.	42
Figura 4.10. Vista superior da bobina de LDCs com destaque para os parâmetros principais do desenho. Em azul são destacadas dimensões fundamentais, das quais todas as demais dependem.	43
Figura 4.11. Esquema do sistema de medida de força em função do deslocamento vertical e horizontal. Adaptado de [79].	45
Figura 5.1. Vistas da prova de conceito da bobina de LDC.	46
Figura 5.2. Posicionamento das bobinas acima do trilho de ímãs permanentes (a) e principais dimensões dos primeiros LDCs ensaiados (b).	47
Figura 5.3. Força de levitação em função da posição para os LDCs de prova de conceito.	47
Figura 5.4. Esquema da simulação do mancal magnético supercondutor de LDCs.	48
Figura 5.5. Dimensões do trilho de ímãs permanentes do Maglev Cobra usadas nas simulações (adaptado de [60]).	49
Figura 5.6. Primeira etapa da simulação de domínio reduzido: registro do potencial vetorial magnético	52
Figura 5.7. Segunda etapa da simulação de domínio reduzido.	52
Figura 5.8. Diferença entre as regiões de desmagnetização reversível e irreversível em um ímã permanente arbitrário.	53

Figura 5.9. Esquema da curva BxH do ímã de terras-raras utilizado na construção dos trilhos do Maglev Cobra.	54
Figura 5.10. Graus de liberdade no dimensionamento do domínio de simulação reduzido.	54
Figura 5.11. Resultados de simulação de densidade de força de levitação em função da distância para bobinas com diferentes números de LDCs em ZFC.....	56
Figura 5.12. Resultados de simulação de densidade de força de levitação em função da distância para bobinas com diferentes R_i em FC de 50 mm.....	57
Figura 5.13. Resultados de simulação de densidade de força de levitação em função da distância para bobinas com diferentes d em FC de 50 mm.....	58
Figura 5.14. Análise paramétrica de N , d e R_i para o projeto otimizado do mancal de LDCs.	60
Figura 5.15. Vista superior da mesa de corte (a), Fita 2G posicionada sob a lâmina pronta para corte (b), procedimento de corte manual (c) e finalização do corte com tesoura (d).	61
Figura 5.16. Comparação entre o corte à lâmina e o corte à tesoura na Fita 2G.	62
Figura 5.17. Esqueleto da bobina feito em PLA pela impressora 3D (a) e laços envoltos em teflon montados no esqueleto (b).	62
Figura 5.18. Bobina falsa de PLA (a), posicionamento dos componentes para moldagem (b), adição da borracha de silicone líquida (c) e molde finalizado pronto para uso (d).	63
Figura 5.19. Bobina montada no molde, pronta para a impregnação.....	64
Figura 5.20. Cápsulas de metal de Wood utilizadas para a impregnação das bobinas.	65
Figura 5.21. Vertendo metal de Wood fundido no molde vasado dentro da estufa.....	65
Figura 5.22. Dimensões das bobinas fabricadas.....	66
Figura 5.23. Par de bobinas de LDCs finalizadas.	66
Figura 5.24. Posicionamento das bobinas em relação ao trilho de ímãs permanentes para os testes de força números 2 a 14.	68
Figura 5.25. Resultados dos testes número 1.	69
Figura 5.26. Resultados dos testes números 2 a 6.	70
Figura 5.27. Comparação entre valores medidos no teste número 5 e simulados.	72
Figura 5.28. Comparação entre o par de bobinas e o criostato original.	73
Figura 5.29. Resultados dos testes de flux creep (7 a 10).....	74
Figura 5.30. Resultados dos testes de flux pump (11 a 14).....	75
Figura 5.31. Comparação entre testes de creep e pump no criostato e nas bobinas. .	76

Figura 5.32. Posicionamento das bobinas em relação ao trilho de ímãs permanentes para os testes de força números 15 a 17.	76
Figura 5.33. Resultados dos testes 15 a 17 do par de bobinas perpendiculares ao trilho.	77
Figura A.1. Gabarito de corte em G10 de 0,5 mm de espessura.	88
Figura A.2. Molde dos LDCs em pequena escala, feitos em G10 na CNC: vista superior (a) e isométrica (b). Bobina LDC de pequena escala feita com o primeiro molde.	90
Figura A.3. Segunda versão do molde, com montagem horizontal da parede externa.	91
Figura A.4. Esquema da montagem da segunda versão do molde em G10.	91
Figura A.5. Resultado ruim do teste de impregnação com resina para aplicações criogênicas.	92
Figura A.6. Testes de impregnação com metal de Wood: imersão em banho de metal (a) e aplicação com soprador de ar quente (b).....	93
Figura A.7. Bobina LDC feita no 2º molde com destaque para algumas partes em que a impregnação ficou com falhas.	94
Figura A.8. Bobina LDC feita no 2º molde depois dos defeitos da impregnação serem recobertos manualmente com auxílio de um ferro de solda.	94
Figura A.9. Laços interno e externo de uma bobina degradada após retirar a impregnação.	95
Figura A.10. Laços da bobina degradada desmontada com vários pontos de delaminação.	96

Lista de Tabelas

Comparação de JC entre o YBCO em bloco maciço e Fita 2G	14
Linhas de maglev que operam a nível comercial [52].	23
Parâmetros utilizados na configuração dos ímãs permanentes do trilho do Maglev	
Cobra	50
Parâmetros utilizados na configuração dos laços de Fitas 2G	50
Tempos de simulação utilizando trilho de ímãs permanentes em malha móvel	51
Força por laço e custo da levitação para diferentes números de LDCs com $R_i = 12,5$ mm e $d = 0,2$ mm.....	56
Combinações de parâmetros analisados.....	59
Resumo dos Ensaios de Força Realizados com as Bobinas.....	67
Parâmetros alterados para tentativa de ajuste do modelo à prática	72

Lista de Símbolos

- T – Temperatura
- H – Intensidade de Campo magnético
- J – Densidade de corrente
- B – Densidade de Fluxo Magnético
- T_C – Temperatura crítica da supercondutividade
- H_C – Campo magnético crítico da supercondutividade
- J_C – Densidade de corrente crítica da supercondutividade
- E – Campo Elétrico
- μ_0 – Permeabilidade Magnética do Vácuo
- H_{C1} – Primeiro campo magnético crítico do supercondutor de Tipo II
- H_{C2} – Segundo campo magnético crítico do supercondutor de Tipo II
- Φ_0 – *Quanta* de Fluxo Magnético
- h – Constante de Planck
- e – Carga Elementar
- B_F – Campo magnético no interior do Fluxóide
- F_L – Força de Lorentz
- J_S – Densidade de corrente de transporte no supercondutor
- v_d – Velocidade de deslocamento do Fluxóide
- E_L – Campo elétrico induzido pelo deslocamento do Fluxóide
- J_e – Densidade de corrente de engenharia da Fita 2G
- n – Índice de Transição da *Power Law*
- θ – ângulo de incidência do campo magnético
- J_{c0} – Densidade de corrente crítica sem campo magnético incidente
- k – Fator de anisotropia
- B_c – Densidade de fluxo de decaimento
- b – Coeficiente de amortecimento
- $B_{||}$ – Componente da densidade de fluxo magnético paralela ao plano AB
- B_{\perp} – Componente da densidade de fluxo magnético ortogonal ao plano AB
- N – Número de laços duplos cruzados
- L – Largura da fita supercondutora
- d – Distância entre as camadas da pilha de fitas supercondutoras
- R_i – Espaçamento interno da bobina de laços duplos cruzados

Lista de Abreviaturas

MEF – Método de Elementos Finitos

MDF – Método das Diferenças Finitas

BCS – Modelo de Bardeen, Cooper e Scribeffer

HTS – Supercondutores de alta temperatura crítica

LTS – Supercondutores de baixa temperatura crítica

YBCO – Óxido de Ítrio-Bário-Cobre

(RE)BCO – Óxido de (Terras Raras)-Bário-Cobre

BSCCO – Óxido de Bismuto-Estrôncio-Cálcio-Cobre

Fitas 1G – Fitas supercondutoras de primeira geração

Fitas 2G – Fitas supercondutoras de segunda geração

FC – Resfriamento na presença de campo magnético (*Field Cooling*)

ZFC – Resfriamento sem presença de campo magnético (*Zero Field Cooling*)

CF – Concentrador de Fluxo

MA – Magnetizador Axial

Hb – *Hallbach*

MIL – Motor de Indução Linear

LDC – Laço Duplo Cruzado

1 Introdução

Este documento refere-se à tese de doutorado que propõe a utilização de fitas supercondutoras de segunda geração para a construção de bobinas de laços supercondutores. A seguir será feita a introdução ao texto, onde serão abordadas as motivações e objetivos da tese.

1.1 Motivações

Os veículos de levitação magnética, conhecidos como *MagLevs*, são uma recente tecnologia em transporte urbano de alta eficiência energética. Dentre os projetos deste tipo no mundo, o MagLev Cobra brasileiro se destaca como o único a atingir nível de protótipo operacional utilizando a técnica de levitação supercondutora. Esta filosofia de levitação consiste na interação entre blocos de material supercondutor resfriados com nitrogênio líquido e um trilho de ímãs permanentes de terras raras.

Com a evolução do protótipo, observou-se que o uso de blocos supercondutores para a levitação traz consigo uma série de questões que prejudicam o avanço do projeto. Uma delas é que não se consegue produzir blocos supercondutores em larga escala com qualidade e homogeneidade suficientes para atender às necessidades de expansão do projeto a nível industrial. Outra é o fato de que só existe um único fornecedor no mundo, de forma que o projeto está à mercê dos interesses e limitações deste. Estes fatos, principalmente, motivam a busca pelo domínio tecnológico na construção de um sistema de levitação que atenda às necessidades do MagLev Cobra.

Além disso, existem outras formas de produção de supercondutores, como fitas flexíveis multicamadas, que possuem qualidade superior aos blocos e produção em larga escala por vários produtores no mundo (AMSC, SuperPower, SuNAM, SuperOX, etc.). Esta possibilidade motiva a substituição dos blocos maciços por fitas supercondutoras em aplicações em que os blocos ainda sejam utilizados, como em mancais magnéticos supercondutores.

1.2 Objetivos

O objetivo desta tese é propor uma geometria inédita de bobina supercondutora utilizando laços de fitas supercondutoras. Estes laços são feitos de forma que não haja nenhuma emenda resistiva e que as correntes neles induzidas sejam persistentes. Nessa tese, elas são testadas como mancais supercondutores para levitação magnética. Propõe-se que estas bobinas sejam utilizadas, por exemplo, para substituir

os blocos supercondutores atualmente empregados em sistemas de levitação magnética, como no MagLev Cobra.

Propõe-se um modelo de simulação com solução pelo método dos elementos finitos no software comercial COMSOL que permita projetar bobinas supercondutoras com estes laços de fitas.

Além das simulações, foram pesquisadas técnicas para o projeto e fabricação dos laços em bobinas, explorando também possíveis materiais para a melhor impregnação do conjunto. Essas técnicas foram validadas na construção de protótipos.

Finalmente, os protótipos passaram por ensaios de força de levitação. Estes resultados comprovam a proposta da tese e são utilizados para comparação com os do atual sistema de levitação e com o modelo de simulação desenvolvido. Com essa análise, são identificados os próximos passos para o avanço da pesquisa em direção ao objetivo final de substituir os criostatos de blocos por de fitas supercondutoras.

1.3 Organização do Texto

Este documento está dividido em seis capítulos. Neste primeiro faz-se uma breve introdução com as motivações e objetivos da tese. No segundo capítulo faz-se uma análise da teoria de supercondutores utilizada no desenvolvimento do trabalho. No terceiro faz-se uma revisão bibliográfica do estado da arte da levitação magnética supercondutora, partindo de mancais magnéticos em direção aos veículos de levitação, *maglevs*. No quarto capítulo explica-se detalhadamente a proposta da tese e a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos. No quinto capítulo são mostrados os resultados obtidos e faz uma série de análises comparativas e o sexto capítulo conclui a tese e propõe trabalhos futuros.

2 Teoria de Supercondutividade

Neste capítulo serão abordados os principais aspectos acerca da teoria de supercondutividade necessários à elaboração deste projeto. Deve-se ressaltar que o campo da supercondutividade possui uma vasta teoria, de aspectos fenomenológicos macroscópicos à física quântica. Nesta tese, propõe-se uma forma inédita de mancal magnético supercondutor, de forma que não estaremos interessados nos pormenores da física do estado, mas sim na representação do comportamento eletromagnético a nível macroscópico para projetar esta aplicação. Estes serão os aspectos abordados neste capítulo.

2.1 Breve Histórico

Dá-se o nome de supercondutor ao material capaz de atingir o estado termodinâmico da matéria homônimo quando submetido a temperaturas criogênicas. Ele é reconhecido pela ocorrência de algumas características notáveis: primeiramente, a capacidade de condução de correntes elétricas contínuas em regime permanente sem qualquer dissipação, ou seja, resistividade nula; segundo, pela ocorrência do diamagnetismo perfeito, com a completa repulsão ou aprisionamento quantizado do campo magnético em seu interior.

Foi no ano de 1911 que o físico Holandês Heike Karmeligh Onnes fez a descoberta do fenômeno que ele batizou de supercondutividade ao estudar as propriedades elétricas do mercúrio resfriado com hélio líquido [1], cujo processo de obtenção também é de sua autoria [2]. Tais feitos o renderam o prêmio Nobel de física de 1913.

Na época, uma das hipóteses era de que a resistividade de um material tendesse a zero, ou algum valor muito baixo dependendo do nível de pureza, conforme a temperatura se aproximava do zero absoluto. A ideia de utilizar mercúrio advinha da facilidade na sua obtenção com altíssimo grau de pureza. A surpresa se deu quando aos 4,2 K a resistividade subitamente tendeu a zero. Esse ponto é conhecido como sendo a Temperatura Crítica (T_c).

Ele também observou que, além da temperatura, a exposição a um campo magnético suficientemente grande era capaz de suprimir o estado supercondutor, mesmo abaixo de T_c . Assim foi definido o Campo Magnético Crítico (B_c), que foi corroborado pelas observações de Walther Meissner e Robert Ochsenfeld, ao

descobrirem que os supercondutores se comportavam como diamagnetos perfeitos, chamado Efeito Meissner-Ochsenfeld [3].

Os supercondutores também possuem um limite na sua capacidade de condução de correntes sem perdas. Esse terceiro parâmetro é conhecido por Densidade de Corrente Crítica (J_c). Portanto, podemos definir a região do espaço T-H-J, conforme na Figura 2.1, para um supercondutor de tipo II, em que a existência do estado supercondutor exige a permanência simultânea sob os valores críticos destes três parâmetros. É importante ressaltar que tais limites críticos são interdependentes. Na bibliografia, costuma-se definir T_c como uma constante inerente ao material, um $H_{irr}(T)$ e um $J_c(T,H)$.

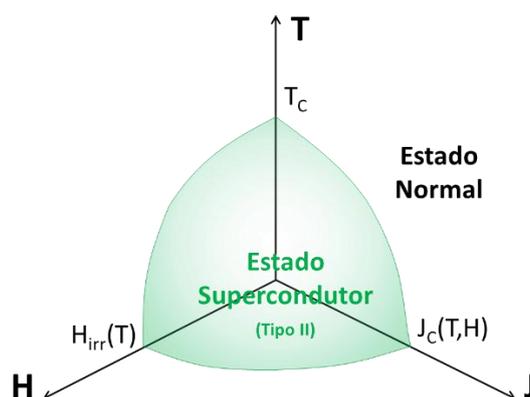


Figura 2.1. Região do espaço T-H-J onde o estado supercondutor é possível, com destaque para os limites críticos de um supercondutor do tipo II.

Atualmente, vários materiais são conhecidos por apresentar o estado supercondutor, portanto, não se pode dizer que é um fenômeno raro. Só em termos da tabela periódica, uma grande parte dos elementos de transição apresenta o estado à pressão ambiente e uma boa parte dos ametais o apresenta somente sob pressões elevadas (da ordem dos GPa), conforme mostrado na Figura 2.2 [4-6]. No entanto, nenhum desses materiais puros possui aplicabilidade.

A modelagem do estado supercondutor a princípio se baseou em descrições fenomenológicas e na tentativa de encaixar os comportamentos observados ao eletromagnetismo clássico. Os irmãos Fritz e Heinz London descreveram em 1935 que, quando um supercondutor é submetido a um campo magnético externo, ele é blindado por correntes superficiais sem perdas (chamadas supercorrentes) que induzem campos magnéticos no seu interior de forma a se contrapor ao campo externo [7], explicando o diamagnetismo.

As limitações que o modelo de London possuía foram resolvidas pelo modelo de Ginzburg e Landau em 1950, que propunha uma teoria para o comportamento dos supercondutores [8]. A partir deste ponto passa a existir uma classificação em dois grupos de supercondutores. Os de Tipo I são aqueles que apresentam Efeito Meissner pleno, enquanto os de Tipo II são os que apresentam o Estado Misto, contendo regiões de estado normal com fluxo magnético, fato que será melhor discutido na sessão 2.2.

Em 1957, John Bardeen, Leon Cooper e Robert Scribeffer desenvolveram uma teoria microscópica conhecida como Teoria BCS [9], que teve sucesso para explicar os supercondutores até 1986, quando foram descobertos os supercondutores de Alta Temperatura Crítica, apresentados na sessão 2.4. Até os dias de hoje, ainda não existe um modelo único que consiga descrever o comportamento dos supercondutores em sua plenitude.

A evolução dos materiais supercondutores está grandemente relacionada com a viabilização de suas aplicações. Com o passar dos anos, vários supercondutores foram sendo descobertos, mas pouquíssimos possuem aplicabilidade. Por exemplo, o nióbio (Nb, 9,2 K) cuja supercondutividade foi descoberta em 1930, não possui aplicabilidade, porém a liga de nióbio-titânio (Nb-Ti, 9,2 K), de 1962, é o supercondutor mais utilizado no mundo atualmente [10] em eletroímãs de alto campo. De temperaturas críticas mais elevadas destacam-se o óxido de ítrio-bário-cobre (YBCO, 92 K, 1987), e suas variantes de terras raras, REBCO, que é o tipo de supercondutor utilizado neste trabalho, os óxidos de bismuto-estrôncio-cálcio-cobre (BSCCO, 90 K ou 110 K, 1988) e o diboreto de magnésio (MgB_2 , 39 K, 2001).

Além disso, a manutenção do estado supercondutor na presença de campos magnéticos elevados e, principalmente, a dependência da densidade de corrente crítica com o campo magnético são também focos de interesse no desenvolvimento destes materiais, especialmente em aplicações que fazem uso da propriedade de conduzir altas correntes com baixa perda. Baseado nisso que os principais fabricantes de supercondutores no mundo inovam a fim de atender seu mercado, como a *SuperPower*, *American Superconductors*, *Bruker* e *SuperOx*, algumas produtoras das chamadas Fitas 2G, baseadas em YBCO, apresentadas na sessão 2.5.

2.2 Aprisionamento de Fluxo Magnético

Com relação ao diamagnetismo, foi descoberto experimentalmente a existência de dois comportamentos diferentes. O primeiro é o já mencionado Efeito Meissner-Oschensfeld, caracterizado pela completa expulsão do campo magnético do interior de um domínio no estado superconductor. Nesse caso, existe um H_c que delimita os estados. O segundo é a expulsão parcial do campo magnético em domínios microscópicos de estado normal no interior do superconductor maciço, chamado Estado Misto. Nesse caso, existem dois campos críticos. O H_{c1} separa o estado Meissner do Misto. O H_{c2} delimita os estados Misto e Normal, este sendo da ordem de alguns teslas a centenas de tesla. Entre H_{c1} e H_{c2} caracteriza-se o Estado Misto, onde os supercondutores com aplicabilidade operam. A Figura 2.3 ilustra estas diferenças entre os dois tipos.

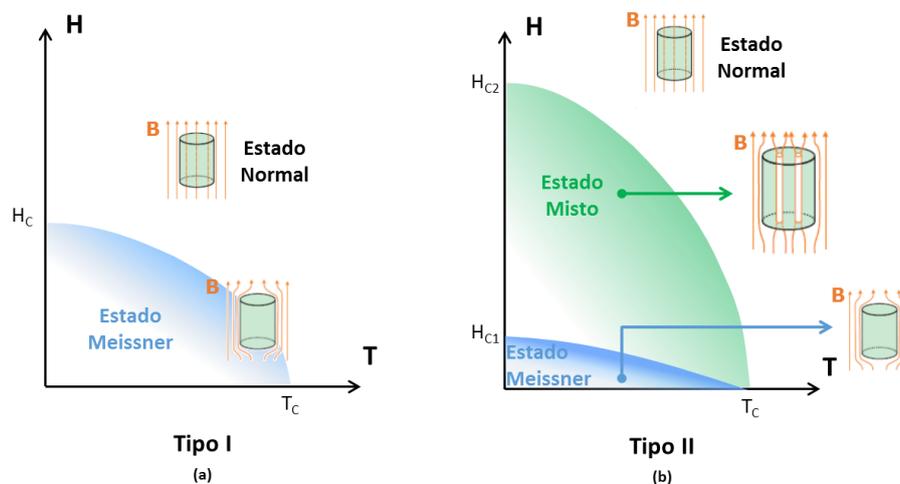


Figura 2.3. Diferenças entre os supercondutores de Tipos I e II com relação ao campo magnético [8].

A diferença entre os Tipos I e II pode ser explicada na teoria de Ginzburg e Landau [9]. A penetração parcial do fluxo magnético num superconductor de Tipo II no Estado Misto se dá de maneira quantizada, de forma a maximizar a superfície entre os meios. Para isso, o campo fica aprisionado em microestruturas chamadas fluxóides, que consistem em domínios de estado normal no interior do material superconductor contendo um *quantum* de fluxo magnético, definido por (2.1) [11]:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,068 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (2.1)$$

em que h é a constante de Planck e e é a carga elementar (do elétron). Cada fluxóide é circundado por um vórtice de supercorrente. Esses elementos de fluxo se organizam

dentro do supercondutor maciço em uma rede bem definida, de geometria hexagonal, chamada de Rede de Abrikosov, mostrada na Figura 2.4, em homenagem ao cientista Alexey Abrikosov, pela sua descrição em 1956 [11].

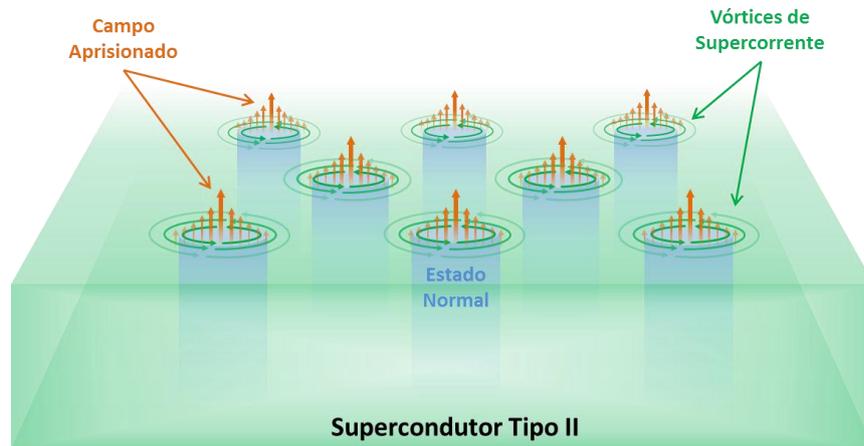


Figura 2.4. Rede de Abrikosov em um supercondutor do Tipo II.

A rede de fluxóides é formada quando há transição para o estado supercondutor na presença de um campo magnético. Nesse instante, parte do campo magnético é expelido pelo Efeito Meissner e parte penetra no supercondutor. Este processo de refrigerar o supercondutor na presença de campo é conhecido como *field cooling* (FC) e quando refrigera-se sem presença de campo é conhecido como *zero field cooling* (ZFC).

O fato de o campo não poder variar (idealmente) dá ao supercondutor a capacidade de se opor a qualquer efeito que cause uma variação da configuração de campo original em seu interior. Este é o fundamento da levitação magnética supercondutora. Quando um supercondutor submetido a FC sofrer, por alguma razão, variações na condição original de campo, uma força automaticamente surge no sentido de restaurar esta condição original, conforme pode ser exemplificado pelas Figura 2.5 e Figura 2.6.

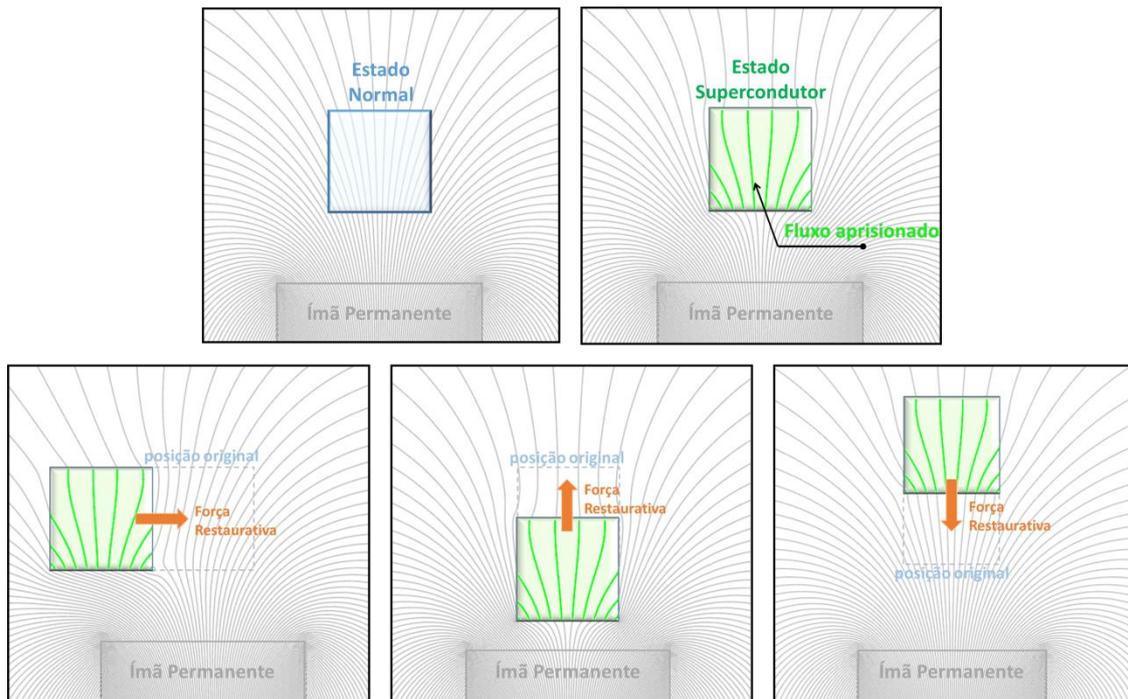


Figura 2.5. Esquema de como o campo aprisionado num supercondutor hipotético submetido a FC impõe uma força restaurativa em resposta à modificação da posição original.

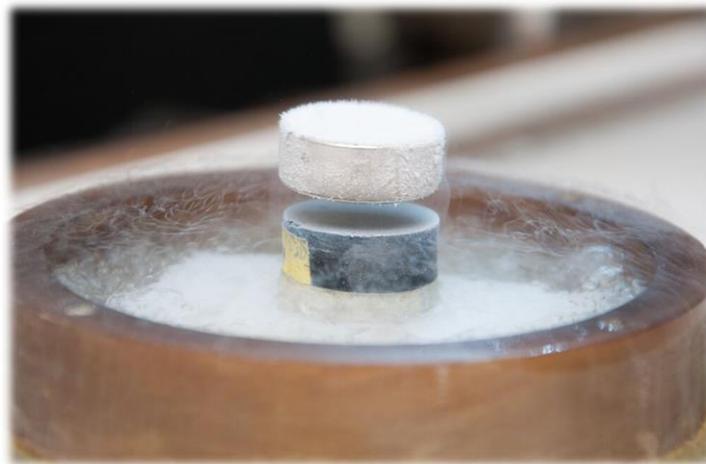


Figura 2.6. Exemplo de um ímã permanente levitando sobre uma pastilha de supercondutor em banho de nitrogênio líquido.

A força da interação entre um supercondutor e um campo magnético externo (proveniente de um ímã permanente, por exemplo) advém da capacidade de aprisionamento de fluxo na rede de vórtices. Quando submetido a um processo de FC, o supercondutor tenderá a se manter na condição original de campo magnético através de forças restaurativas. Estas forças são proporcionais à densidade de fluxo magnético e ao seu gradiente e, tradicionalmente, são obtidas através de arranjos de ímãs permanentes em configurações especiais, tratadas mais detalhadamente na sessão 3.2.

2.3 Dinâmica de Vórtices e Corrente Crítica

A forma como a Rede de Abrikosov se comporta em um supercondutor está intimamente relacionada com o seu desempenho em uma aplicação. Primeiramente, é importante ressaltar que esse sistema, formado por fluxóides, está sujeito a forças de Lorentz e pode se mover no interior do supercondutor.

Define-se a densidade de corrente de transporte, J_s , como a corrente imposta (ou induzida) em um supercondutor que não seja aquela inerente à formação dos fluxóides. Logo, em um supercondutor de Tipo II permeado por uma J_s , haverá uma interação com os fluxóides, cujo campo magnético aprisionado pode ser definido como B_F , gerando uma Força de Lorentz, F_L dada pela Equação (2.2), conforme mostrado pela Figura 2.7. Sem nenhuma força para contrabalançar a de Lorentz, os fluxóides tendem a se deslocar com uma velocidade v_d , induzindo um campo elétrico E_L , de acordo com a Equação (2.3).

$$\vec{F}_L = \vec{J}_s \times \vec{B}_F \quad (2.2)$$

$$\vec{E}_L = \vec{v}_d \times \vec{B}_F \quad (2.3)$$

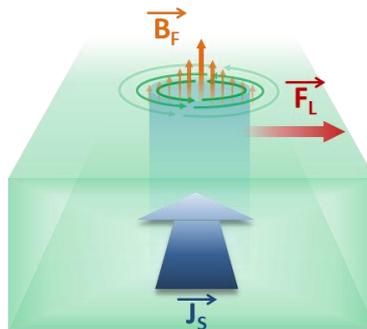


Figura 2.7. Indução da Força de Lorentz sobre um fluxóide.

Este campo elétrico possui a mesma direção da corrente, porém sentido contrário. Essa interação entre corrente e campo elétrico caracteriza uma dissipação de energia que, embora não seja de natureza ôhmica, ainda é térmica e leva à perda da supercondutividade.

Se a rede de Abrikosov se movesse livremente devido a força de Lorentz, o J_c seria nulo, de forma que não haveria utilidade prática para os supercondutores de tipo II. Para contornar isso, foram desenvolvidas técnicas de mantê-la no lugar, mesmo

submetida à corrente de transporte, conhecidas na literatura como aprisionamento de fluxo (*pinning*). Ela pode ocorrer pela ação de diversos tipos de inhomogeneidades estruturais, tais como fronteiras de grãos, variações na composição molecular ou adição de impurezas [12].

A densidade de corrente crítica J_c é a que leva a uma superação das forças de aprisionamento, deslocando as redes ao ponto de apresentar uma resistividade mensurável [13]. Se não fossem as forças de aprisionamento, um supercondutor teria um J_c muito baixo, a ponto de não ser aplicável.

Em densidades de corrente de transporte suficientemente baixas, as forças de Lorentz são menores que a máxima força de aprisionamento, de forma que a rede de vórtices não consegue se movimentar, não havendo indução de campo elétrico ou dissipação de calor, ou seja, sem resistividade. Conforme J_s se aproxima de J_c , a rede começa a se movimentar e a dissipação torna-se perceptível. Ao passo em que a densidade de corrente se torna pouco maior que J_c , a evolução do campo elétrico (e, conseqüentemente, da dissipação térmica) torna-se extremamente acelerada. Nesses casos, a perda do estado supercondutor leva a um superaquecimento tão abrupto que chega a ser capaz de vaporizar o material (*quenching*).

A forma de se modelar esse comportamento em um supercondutor é conhecida como Curva E-J, mostrada na Figura 2.8. O Campo Elétrico Crítico, E_c , é o parâmetro para a determinação de J_c , definido experimentalmente como sendo $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ [14]. A equação que descreve essa curva é conhecida na literatura como a Lei de Potência (*Power Law*) (2.4) [14]. Quando observada em escala logarítmica, a inclinação da Curva E-J mostra os estágios da transição para o estágio normal:

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n . \quad (2.4)$$

O termo exponencial n da Lei de Potência é conhecido na literatura como Índice de Transição [14] e pode variar bastante de um material supercondutor para o outro, bem como durante a transição, dividindo a Curva E-J em 3 estágios bem definidos [15, 16]:

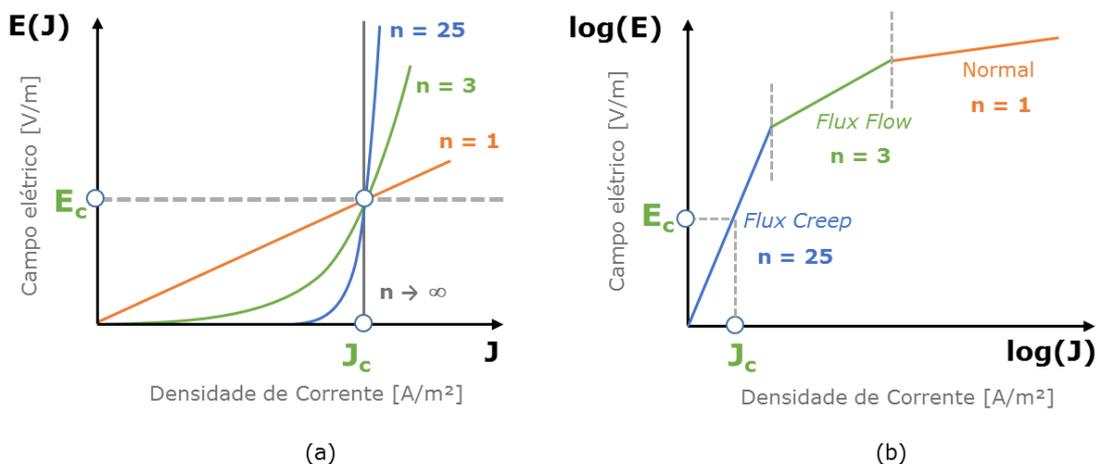


Figura 2.8. Comportamento da Curva E-J nas redondezas de J_c (a) e até a completa transição ao estado normal com destaque para as etapas do processo em escala Log (b). Adaptado de [17].

Flux Creep: As forças de Lorentz devido às correntes de transporte começam a superar às forças de *pinning*, fazendo com que a rede se mova lentamente. Para fitas de REBCO, n varia de 20 a 30 [18].

Flux Flow: Neste estágio as forças de Lorentz são consideravelmente maiores que as de *pinning*, de forma que as redes de vórtices se movem quase que livremente. O índice n nesse estágio varia de 2 a 4 para o REBCO [18].

Normal: Neste ponto, a rede de vórtices foi completamente dispersa, de forma que não existe mais o estado supercondutor e o material se comporta como um condutor ordinário, de resistividade linear. O índice n é igual a 1.

Os parâmetros J_c e n são obtidos tradicionalmente para cada material de forma experimental. É sabido da literatura que esses termos possuem dependências não lineares com a temperatura e com o campo magnético. Assim, a obtenção destas características de forma suficientemente abrangente tem sido foco de pesquisas [19] a fim de se desenvolver modelos verossímeis para os projetos de aplicações.

Devido ao *Flux Creep*, as forças entre um supercondutor e um campo magnético externo tendem a diminuir com o tempo. Esse fenômeno pode ser descrito como uma relaxação das linhas de fluxo por ativação térmica, obedecendo a um comportamento exponencial com uma grande constante de tempo [20]. Por exemplo, uma forma de se verificar esse comportamento é a partir da medição da evolução no tempo da força de um supercondutor ao ser aproximado de um ímã permanente, conforme mostrado na Figura 2.9.

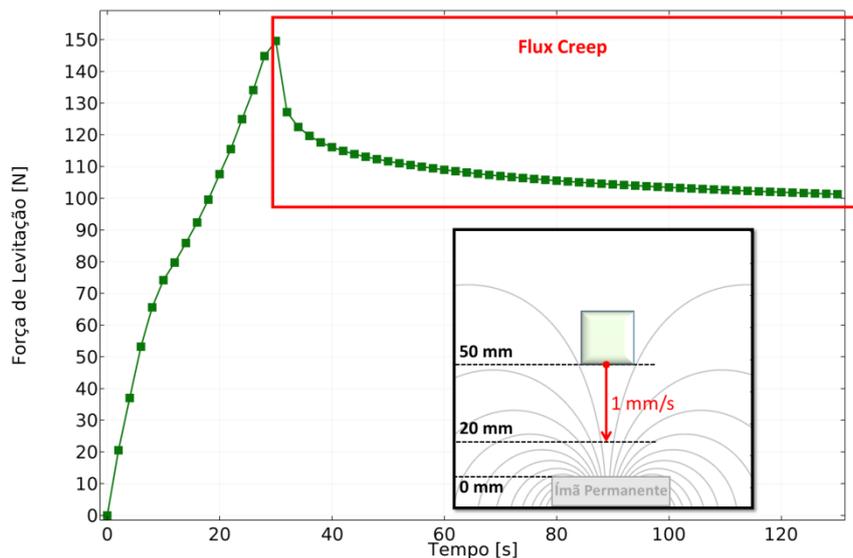


Figura 2.9. Exemplo de *Flux Creep* na força de levitação entre um ímã permanente e um supercondutor hipotético submetido a FC e aproximado 30 mm a 1 mm/s.

2.4 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

A Teoria BCS só previa a existência do estado supercondutor até abaixo dos 30 K, o que causou espanto na comunidade científica à ocasião da descoberta do supercondutor La-Ba-Cu-O, cuja T_c é de 32 K à pressão atmosférica, por Bednorz e Müller em 1986. Essa descoberta abriu o precedente para as pesquisas por materiais supercondutores a temperaturas cada vez mais altas. Estes supercondutores são conhecidos como Supercondutores de Alta Temperatura Crítica (na bibliografia pela sigla *HTS*). O mais usado é o REBCO, devido ao seu desempenho superior em campos magnéticos intensos e correntes alternadas. Sua T_c é 92 K, podendo, portanto, ser resfriado com nitrogênio líquido. A vantagem de se atingir o estado supercondutor a temperaturas mais altas é o aumento da eficiência energética do processo de refrigeração, visto que ela decresce de forma quase exponencial com a diminuição da temperatura de regime.

Neste trabalho foram utilizadas fitas com camadas de REBCO. Ele é obtido por um processo de crescimento orientado e oxigenação. A qualidade do supercondutor está intimamente relacionada com esses processos, além de ser difícil de garantir boa homogeneidade na sua produção tradicional em forma de blocos. Isso fez com que a indústria investisse no desenvolvimento das Fitas Supercondutoras, tratadas a seguir.

2.5 Fitas Supercondutoras

A produção de blocos maciços de YBCO é problemática por não existir uma técnica eficiente para produção em larga escala e ser difícil de manter um padrão de qualidade, com amostras suficientemente homogêneas.

No caso de fitas, ao invés do crescimento orientado em grandes blocos maciços, ele é feito em filamentos ou camadas micrométricas, aumentando muito sua homogeneidade e, conseqüentemente, as capacidades do material. Além disso, são mais flexíveis mecanicamente que os blocos, de forma que possam ser manuseadas de maneira similar aos condutores convencionais, permitindo sua utilização de formas antes impraticáveis.

A primeira geração de fitas supercondutoras (Fitas 1G) possui filamentos de BSCCO (Bi-2223) e uma matriz de prata que representa cerca de 70% do seu volume. Sua aplicabilidade é limitada devido à alta dependência de J_c com o campo magnético. A partir de 2005 foram introduzidas as fitas supercondutoras de segunda geração (Fitas 2G), que utilizam o REBCO e um processo produtivo diferente das antecessoras, mais avançado, por deposição orientada multicamada sobre um substrato metálico. Elas possuem uma menor relação US\$/kA.m que as Fitas 1G, além de uma melhor resposta à incidência de campo magnético e melhor desempenho quando conduzindo correntes alternadas.

As Fitas 2G são muito mais atraentes economicamente e são produzidas em escala industrial por alguns fabricantes no mundo, como a *SuperPower*, *American Superconductors*, *Shanghai Superconductor*, *Bruker*, *SuNAM* e *SuperOx*. Em comparação aos blocos supercondutores maciços, elas possuem capacidades de condução muito superiores, conforme mostrado na Tabela 2.1. A título de comparação, a densidade de corrente máxima de trabalho dos condutores de cobre eletrolítico à temperatura ambiente é de cerca de 3×10^6 A/m². Essa diferença se dá pelo fato de o filme supercondutor possuir estrutura bastante homogênea e altamente orientada, bem próxima a um monocristal. Para os blocos, por outro lado, não é possível garantir tais propriedades pelas técnicas de produção existentes.

Tabela 2.1. Comparação de J_c entre o YBCO em bloco maciço e Fita 2G [21]

Temperatura		4 K	77 K
J_c do YBCO	Em bloco	8×10^{10} A/m ²	1×10^9 A/m ²
	Em Fita 2G	$1,37 \times 10^{11}$ A/m ²	3×10^{10} A/m ²

Vale ressaltar que as Fitas 2G possuem espessuras de 50 μm a 100 μm , com uma camada de 1 μm de material supercondutor em seu interior. Sendo assim, para cálculos de projeto, usa-se a densidade de corrente de engenharia, que leva em consideração toda a área de sessão transversal da fita. Ainda assim, mesmo sendo entre 1% e 2% da densidade de corrente do supercondutor puro, ela ainda está ordens de grandeza acima dos condutores de cobre convencionais.

As Fitas 2G têm sido amplamente empregadas em diversos projetos de supercondutividade aplicada em sistemas elétricos, como cabos de distribuição de energia [22, 23], máquinas [24-26], limitadores de corrente de curto-circuito [27-29] e, neste projeto, propõe-se seu uso nos novos mancais do MagLev Cobra.

Embora o supercondutor utilizado nas fitas 2G seja tradicionalmente chamado de YBCO, não é usual o uso exclusivo de Ítrio na composição, mas sim uma combinação de terras-raras. Tanto que comercialmente encontra-se a designação REBCO, onde RE refere-se às terras raras (*rare-earths*). As variações são frutos de estudos em busca de se melhorar as capacidades de aprisionamento de fluxo, especialmente visando à diminuição da sensibilidade de J_c com a intensidade do campo magnético, o que amplia sua aplicabilidade. Além da variação da composição molecular, também foram introduzidas técnicas de dopagem ao material supercondutor [30, 31]. Em contrapartida, o comportamento de J_c destas fitas mais recentes é mais não-linear e sensível à direção do campo magnético, tornando o processo de caracterização e modelagem mais complexo. Um exemplo de caracterização de uma fita supercondutora em função de magnitude e inclinação de campo incidente é mostrado na Figura 2.10.

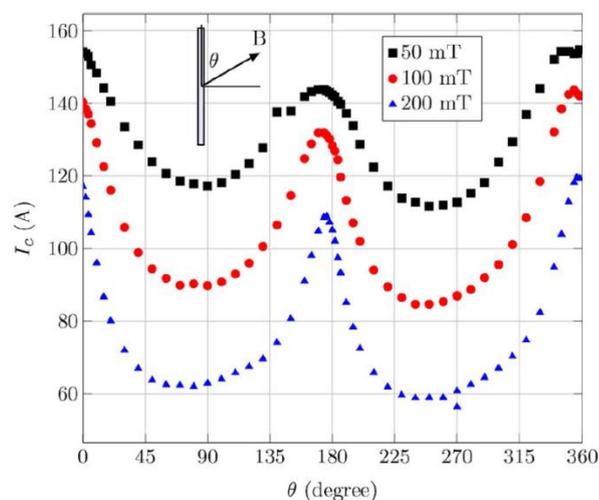


Figura 2.10. Medida da dependência angular da corrente crítica com campo magnético para uma fita de REBCO. Adaptada de [19].

2.6 Dependência da Corrente Crítica com o Campo Magnético

Os supercondutores utilizados nesse trabalho possuem estrutura cristalina em camadas, conforme mostrado na Figura 2.11, em que os planos de óxido de cobre são os responsáveis pela condução das supercorrentes. Essa estrutura é a razão pela qual esse tipo de supercondutor apresenta considerável anisotropia na densidade de corrente crítica, que depende não somente da magnitude, mas também da direção do campo magnético incidente, sendo um $J_c(B, \theta_B)$. Na figura também estão identificados o plano ab e o eixo c. O plano ab é o de condução, por onde as supercorrentes fluem de maneira preferencial. O eixo c é a direção segundo a qual os tubos de fluxo devem estar orientados.

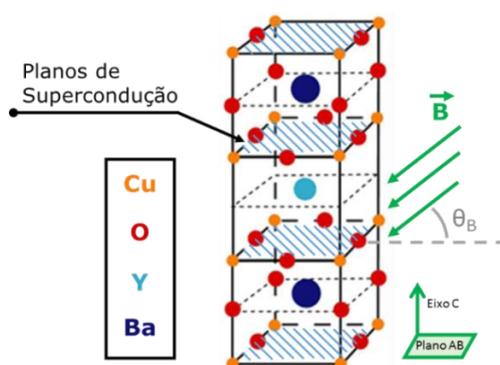


Figura 2.11. Estrutura cristalina do YBCO com destaque para os planos de óxido de cobre. Adaptado de [17].

Em geral, os fabricantes fornecem uma característica da corrente crítica dos seus supercondutores em auto-campo (aquele induzido pela própria corrente medida). No entanto, não detalham sua dependência anisotrópica com campos magnéticos externos de intensidade comparável ao auto-campo. Para o projeto de aplicações como cabos supercondutores ou bobinas supercondutoras de pequenas dimensões (como é o caso desta tese), os efeitos destes campos devem ser levados em consideração para uma correta estimativa da corrente crítica [19]. Portanto, faz-se necessário extrair estas características experimentalmente, o que será abordado na sessão 4.2, no processo que chamamos de caracterização.

Para ilustrar a relevância da dependência de J_c com o campo magnético, a Figura 2.12 mostra o resultado de simulações da densidade de corrente numa fita supercondutora hipotética infinitesimalmente fina, de forma que sua seção transversal possa ser aproximada por um segmento de reta. Dois casos são analisados: no primeiro, não há dependência de campo magnético, sendo J_c constante; no segundo caso, há dependência anisotrópica $J_c(B, \theta)$. Sobre ambos os casos foi imposta uma rampa de corrente de 10 A/s por 25 s e 250 A constante por mais 25 s.

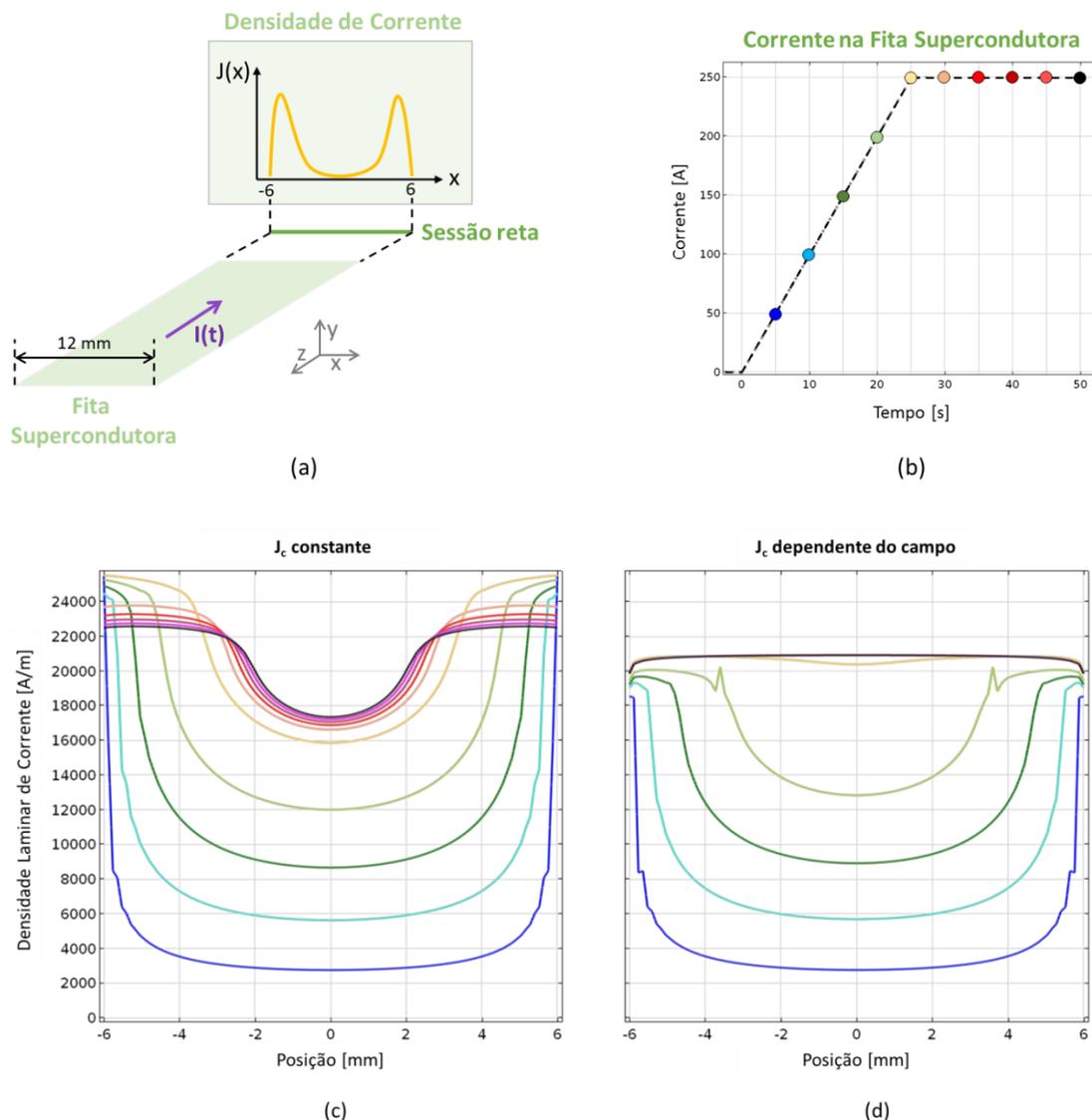


Figura 2.12. Esquema didático da simulação (a), corrente imposta na fita supercondutora (b), e densidade de corrente com J_c constante (c) e dependente do campo magnético (d). As curvas (c) e (d) são coloridas de acordo com o tempo de simulação mostrado em (b). Fonte: o próprio autor.

Desses resultados pode-se observar que, no caso da J_c dependente do campo, a corrente penetra mais rapidamente no centro da fita, além de estabilizar quase que imediatamente após a corrente tornar-se constante. Além disso, o máximo de densidade de corrente alcançável é cerca de 30% menor. Portanto, fica evidente que a dependência da corrente crítica com o campo magnético é relevante para uma modelagem verossímil da aplicação que buscamos desenvolver nesta tese.

Vários autores propõem em seus trabalhos metodologias de obtenção de $J_c(B, \theta)$, o que se configura num problema inverso por buscar uma característica local (densidade de corrente e campo elétrico) a partir de uma medida global (corrente e tensão). Dentre as metodologias existentes, destacam-se as de Rostila *et al.* [32], Pardo *et al.* [33], Zhang *et al.* [34], Gomory *et al.* [35], Grilli *et al.* [19] e Zermeño *et al.* [36].

Nesse trabalho foi utilizado um método inspirado pelo trabalho de Grilli *et al.* [19] que consiste em obter as relações de corrente crítica com amplitude e orientação do campo magnético incidente e em seguida encontrar uma função analítica que se encaixe aos dados obtidos. Para essa segunda etapa, a equação utilizada é a dependência elíptica (2.5), em que os parâmetros são obtidos computacionalmente através de um algoritmo de minimização de erro. Este compara os valores de $J_c(B, \theta)$ medidos com os calculados analiticamente testando a função de ajuste para um conjunto finito de parâmetros J_{c0} , k , B_c e b escolhidos:

$$J_c(B_{\parallel}, B_{\perp}) = \frac{J_{c0}}{\left[1 + \left(\frac{\sqrt{(kB_{\parallel})^2 + B_{\perp}^2}}{B_c}\right)^b\right]} \quad (2.5)$$

em que J_{c0} é a densidade de corrente crítica sem campo magnético incidente, k é o fator de anisotropia, B_c é a densidade de fluxo de decaimento e b é o coeficiente de amortecimento. Aqui, ao invés dos argumentos serem magnitude e direção da densidade de fluxo magnético (B, θ), foi usada a decomposição ortogonal em relação ao referencial do plano do supercondutor (B_{\parallel}, B_{\perp}) por facilidade de implementação na simulação. A desvantagem desse método é justamente a necessidade da determinação da função analítica e do conjunto de parâmetros a serem testados, que não necessariamente incluirá o melhor caso possível e, quanto maior for, mais custoso e demorado será computacionalmente. Por outro lado, utilizar um único grupo de parâmetros para caracterizar as fitas torna mais fácil a sua modelagem, no que diz respeito a ajustes finos para alterar os resultados de simulação.

O método de Zermeño [36] é o mais recentemente publicado e obteve sucesso em desacoplar os efeitos de auto-campo e campo externo da amostra na determinação de $J_c(B, \theta)$. Diferentemente de outros métodos propostos na literatura, ele não faz uso de fórmulas analíticas para a descrição da dependência angular de J_c . O resultado do método é um conjunto de pontos que, uma vez interpolados, podem ser utilizados para modelar estas propriedades do material. O método proposto é rápido e permite ir dos dados experimentais diretamente para o $J_c(B, \theta)$. Além disso, não requer a determinação de uma função analítica nem de um conjunto de parâmetros pré-definidos. Por outro lado, não há regularização no resultado, o que dificulta análises comparativas sem o uso de simulações.

O presente capítulo mostrou um breve levantamento histórico do desenvolvimento da supercondutividade aplicada e abordou os principais conceitos teóricos utilizados no projeto e construção do protótipo de mancal magnético de laços de Fitas 2G. A partir destes fundamentos, a proposta de tese será desenvolvida. A seguir, será tratado do uso das propriedades supercondutoras em mancais magnéticos, que contextualiza esse trabalho na linha de pesquisa em questão.

3 Contextualização do Trabalho

A seguir será feita uma revisão bibliográfica sobre o uso de supercondutores para a levitação magnética, com as técnicas existentes atualmente no mundo, direcionada para a proposta de utilização da tese, que é no projeto MagLev Cobra. Sendo este um veículo de transporte urbano baseado em um mancal magnético linear supercondutor, a análise será feita a partir dos mancais magnéticos.

3.1 Mancais Magnéticos

Mancais magnéticos são equipamentos capazes de suportar cargas mecânicas em movimento rotacional, translacional ou estáticas através da ação de forças advindas de interações eletromagnéticas, não havendo assim contato entre as partes fixas e móveis. Os mancais mecânicos tradicionais utilizam soluções a partir de fluidos de interface e rolamentos, mas possuem limitações térmicas e estruturais de acordo com a velocidade de operação [37]. Os mancais magnéticos admitem velocidades de operação de centenas de milhares de RPM (para mancais rotativos) ou centenas de km/h (para mancais lineares), visto que não possuem atrito entre as partes. Dessa forma, possuem baixas perdas, maior vida útil e baixa manutenção, no entanto, requerem uma instrumentação rápida e precisa e controle ativo robusto.

O desenvolvimento dessas aplicações se deu no final do Século XX graças, principalmente, à disponibilidade industrial de dispositivos de eletrônica de potência, processadores digitais de custo acessível e sensores mais rápidos e precisos [37]. O acompanhamento dos principais trabalhos e grupos de pesquisa dessa área é registrado na série dos *International Symposium on Magnetic Bearings – ISMB*, realizado bianualmente desde 1988 [38].

3.2 Mancais Magnéticos Supercondutores

Existem duas formas de se aproveitar as propriedades dos supercondutores em mancais magnéticos: de forma ativa ou passiva. A primeira forma compreende os mancais em que bobinas supercondutoras são utilizadas para gerar campos magnéticos intensos. A segunda forma aproveita a propriedade de aprisionamento de fluxo magnético nos supercondutores para sustentar um corpo dotado de campo magnético independente de um controlador externo. Esta é uma das suas grandes vantagens e é esta segunda forma que será utilizada neste trabalho. Uma terceira via é a de mancais híbridos, que utiliza princípios de ambas as primeiras.

Os mancais supercondutores passivos utilizam arranjos especiais de ímãs permanentes para aumentar a densidade de fluxo e o seu gradiente na região onde se localizam os blocos supercondutores de forma a obter as maiores forças restaurativas possíveis. Existem basicamente três geometrias tradicionais de arranjos de ímãs permanentes na bibliografia: Concentrador de Fluxo (CF), Magnetização Axial (MA) e arranjo *Halbach* (Hb) [39]. Para cada projeto, as dimensões, topologias e materiais (uso de peças ferromagnéticas ou não) variam de acordo com as especificidades de cada um. Além disso, esses arranjos também podem variar em simetria, sendo lineares ou axissimétricos (para mancais rotativos). A Figura 3.1 exemplifica algumas possibilidades de cada um dos três tipos de arranjos de ímãs permanentes e suas configurações de campo magnético.

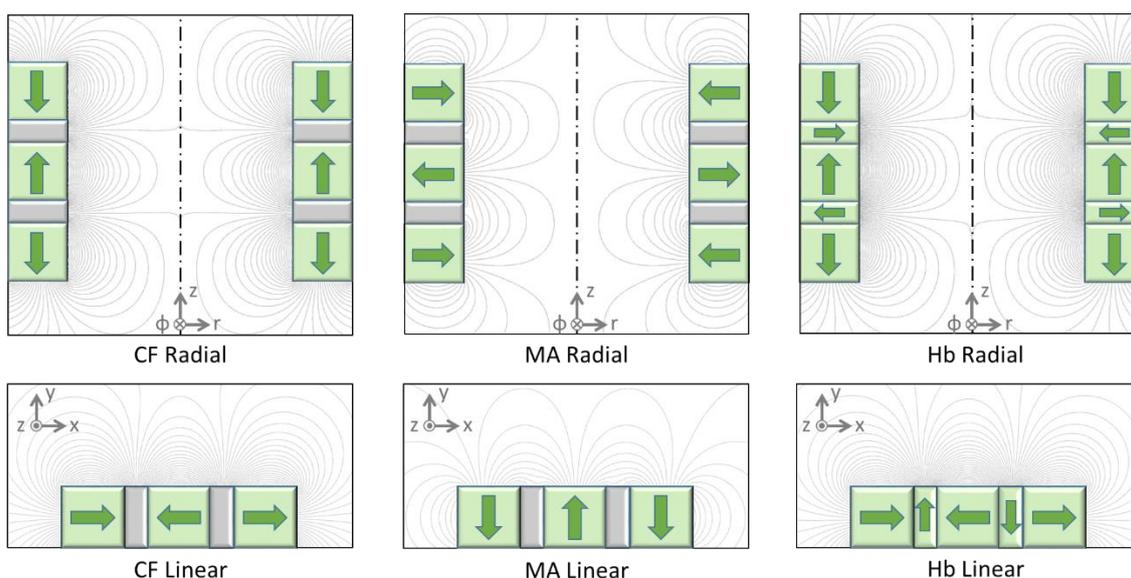


Figura 3.1. Exemplos de arranjos de ímãs permanentes usados em mancais magnéticos supercondutores

Os mancais magnéticos supercondutores possuem dois nichos principais de aplicação: em sistemas de armazenamento de energia cinética, conhecidos na bibliografia como *flywheels*, e em veículos de levitação magnética, os *maglevs*.

3.2.1 Armazenadores de Energia Cinética

Os *flywheels* advêm da ideia de se armazenar energia de forma cinética através de volantes de inércia. Dentre as tecnologias de armazenamento existentes, eles possuem mesma densidade de energia (J/m^3) que baterias, mas com densidade de potência (W/kg) maior, sendo atrativos em uma série de aplicações de pequeno e médio porte [40]. Além disso, pode-se dizer que são ecologicamente amigáveis, visto

que não utilizam materiais agressivos ao meio-ambiente, possuem maior autonomia e durabilidade, se comparados a baterias convencionais.

O trabalho mais antigo que propõe o uso de mancais supercondutores para um *flywheel* data de 1995 [41], com a premissa de minimizar a instabilidade intrínseca aos mancais magnéticos ativos de ímãs permanentes. Possuía uma massa de 19 kg e alcançou velocidade de 2000 RPM com perda inferior a 5% por hora. Nos anos seguintes, vários trabalhos foram desenvolvidos por grupos na Inglaterra [42], Coréia [43], Alemanha [44, 45], Japão [46], Estados Unidos [47] e no grupo de pesquisa brasileiro da UFRJ [40, 48, 49].

Atualmente, os esforços no desenvolvimento de mancais supercondutores para *flywheels* estão voltados para aplicações de estabilização da potência intermitente de fontes renováveis de energia elétrica, que ganham cada vez mais espaço nas matrizes energéticas do mundo. Um dos trabalhos mais proeminentes e recentes publicados nessa linha foi sobre o *flywheel* da usina fotovoltaica de Monte Komekura, na província de Yamanashi, Japão, em 2015. Um dos maiores do mundo, possuindo 4 toneladas e velocidade de até 2950 RPM com 300 kW de potência [50, 51]. Seus mancais supercondutores são híbridos, possuindo bobinas de Fitas 2G para alimentar o campo magnético da parte ativa e blocos de (RE)BCO para sustentar o rotor passivamente. No cenário brasileiro, o mesmo grupo prossegue com pesquisas de mancais híbridos para uso em *flywheels* em continuidade às pesquisas anteriores [40].

3.2.2 Veículos de Levitação Magnética

Os *maglevs* consistem na ideia de substituir o tradicional sistema roda-trilho por um mancal magnético linear. Dessa forma, os veículos podem se movimentar acima da via sem atrito, aumentando rendimento e autonomia, reduzindo as perdas e custo de manutenção. Historicamente, o início dos estudos no ramo se dá a partir de duas patentes (uma nos EUA e outra na Alemanha) que datam da primeira metade do Século XX. Entretanto, foi somente na segunda metade, com o advento de dispositivos semicondutores de eletrônica de potência, que as propostas começaram a se tornar comercialmente viáveis [37]. Com a maturação dos estudos realizados por grupos de pesquisa e empresas, a partir de 1977 a comunidade internacional inserida nesse contexto realiza bienalmente a *International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*.

Existem mais de dez projetos diferentes no mundo, com mais da metade concentrada na China e no Japão. Dentre eles podem-se destacar as quatro linhas em

operação comercial, mostradas na Tabela 3.1. Os demais encontram-se em nível de protótipo de laboratório [52].

Tabela 3.1. Linhas de maglev que operam a nível comercial [52].

País	Cidade	Projeto	Distância	Operação
Japão	Nagoia	HSST-Linimo	9 km	2005
China	Changsha	estatal	18,5 km	2016
	Xangai	Transrapid	40 km	2003
Coréia do Sul	Aeroporto Incheon	KIMM-ECOBEE	6,1 km	2016

A grande maioria dos projetos utiliza mancais magnéticos ativos (não necessariamente utilizando bobinas supercondutoras) com técnicas de levitação eletromagnética [53] ou eletrodinâmica [54]. Somente três projetos utilizam a levitação supercondutora, que é o IFW alemão, em Dresden [55], o protótipo chinês da Universidade de Jiaotong, em Chengdu [56], e o Maglev Cobra no Rio de Janeiro. Destes, somente o terceiro encontra-se em escala real operacional [57, 58].

3.3 O Veículo Maglev Cobra

Este projeto está em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Aplicação de Supercondutores (Lasup) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) desde o ano 2000. Ele já passou pelas etapas de prova de conceito e viabilidade com a construção de um protótipo em escala reduzida [59] e protótipo funcional em ambiente controlado [57]. Desde o ano de 2014 conta com um protótipo operacional, mostrado na Figura 3.2, instalado na Cidade Universitária da UFRJ aberto à visitação pública semanalmente [52, 58]. O protótipo é composto por uma via elevada de 160 m de comprimento conectando dois prédios do complexo do Centro de Tecnologia da UFRJ e um veículo de quatro módulos (dois de ponta e dois centrais) com capacidade para até 12 passageiros por viagem.

O Maglev Cobra possui diversas vantagens construtivas e operacionais quando comparado a um veículo roda-trilho urbano tradicional, como por exemplo, menor custo de implantação devido a uma estrutura mais leve; capacidade de fazer curvas de menor raio e rampas de maiores inclinações; menor consumo energético e emissão de ruídos, conseqüentemente menores impactos ambientais [52].



Figura 3.2. Via elevada e veículo do protótipo operacional do Maglev Cobra na Cidade Universitária da UFRJ

3.3.1 Mancais Magnéticos do Maglev Cobra

Este veículo utiliza o princípio de levitação supercondutora em um mancal magnético linear passivo composto por uma via contendo dois trilhos de ímãs permanentes e blocos de supercondutor em criostatos instalados no veículo, mantendo-o em levitação, conforme mostrado na Figura 3.3. A tração é feita por um motor de indução linear (MIL) de secundário longo em um terceiro trilho independente do mancal magnético.



Figura 3.3. Criostato instalado no Maglev Cobra em levitação sobre o trilho de ímãs permanentes.

Os trilhos de ímãs permanentes foram projetados para maximizar o campo e o gradiente do campo magnético na região de levitação dos supercondutores ao passo que minimizaria o custo em material. Seu desenvolvimento se deu a partir dos resultados dos primeiros protótipos aliados a ferramentas de simulação [60]. Tem-se, portanto, um par de trilhos de ímãs de Nd-Fe-B com aço de baixo teor de carbono (SAE 1020) em um arranjo Hb, conforme esquematizado na Figura 3.4.

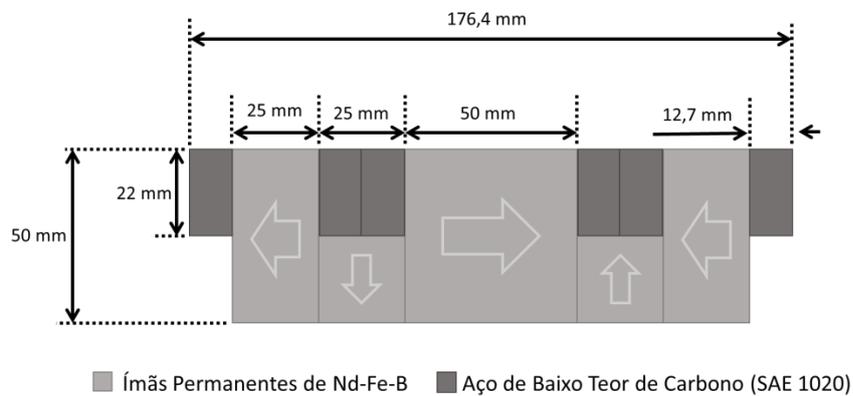


Figura 3.4. Desenho esquemático com dimensões do trilho de ímãs permanentes do Maglev Cobra (adaptado de [60])

Os supercondutores, assim como os criostatos que os comportam, são fabricados e patenteados pela empresa alemã *Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ)*. Eles se localizam na parte inferior dos módulos do veículo e sustentam a estrutura. Os módulos possuem 6 criostatos cada, totalizando 24 unidades no veículo. A Figura 3.5 mostra o posicionamento dos criostatos na parte inferior dos módulos.



Figura 3.5. Criostatos na parte inferior do Maglev Cobra.

O projeto destes criostatos foi feito atendendo a quatro quesitos básicos: fornecer o melhor isolamento térmico possível entre os supercondutores resfriados e o ambiente externo, suportar os esforços inerentes à operação do veículo, garantir a proteção mecânica dos supercondutores contra quaisquer perturbações externas e manter a menor distância possível entre os blocos supercondutores e a região de campo magnético concentrado pelo trilho de ímãs [61]. O primeiro destes, em especial, é primordial para a autonomia e baixo consumo energético do veículo. Para manter a temperatura de nitrogênio líquido nos supercondutores, os criostatos possuem uma camada de alto vácuo (10^{-3} mbar a 10^{-9} mbar) entre sua parede externa e o compartimento interno, onde estão os supercondutores e o reservatório de nitrogênio líquido. A Figura 3.6 mostra um esquema do corte transversal de um criostato do MagLev Cobra. Cada um possui 24 blocos de YBCO arrumados em duas fileiras de 12 blocos e garantem uma força de levitação de aproximadamente 2500 N em uma altura de 8 mm a 10 mm da superfície do trilho de ímãs [62].

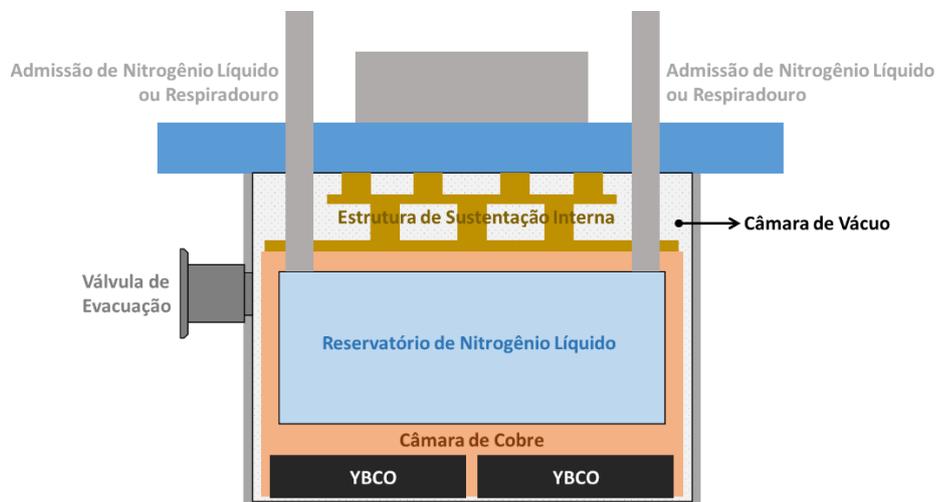


Figura 3.6. Esquema do corte transversal de um criostato do Maglev Cobra.

3.4 Mancais de Fitas Empilhadas

Em geral, o princípio de levitação utilizado nos trabalhos supracitados é o de arranjos de ímãs permanentes com blocos maciços de YBCO. Como alternativa recente, uma nova possibilidade começa a ser explorada com a aplicação de Fitas 2G empilhadas. A vantagem disso está justamente no alto grau de orientação e homogeneidade das Fitas 2G em comparação aos blocos maciços, conforme abordado na sessão 2.5. Além disso, com o avanço das técnicas de fabricação, o aprisionamento de fluxo das fitas passa a ser superior ao dos blocos. Ainda, as Fitas

2G são estruturalmente mais resistentes que os blocos de cerâmica maciços, conseguindo suportar melhor esforços mecânicos.

Uma primeira análise feita por Sass *et al.* em 2013, no Lasup [63], comparou uma pilha de Fitas 2G produzidas pela Superpower de mesmas dimensões que um bloco supercondutor maciço com o objetivo de substituir os utilizados nos criostatos do MagLev Cobra. Para um campo magnético perpendicular ao plano das fitas, foi observada uma força de levitação de 44% da do bloco maciço. Ressalta-se que apenas cerca de 2% do volume das Fitas 2G é efetivamente material supercondutor. À época, o custo das Fitas 2G não compensava uma aplicação do tipo, mas mudanças significativas ocorreram na qualidade delas, de forma que, com o tempo, melhores resultados foram alcançados em trabalhos posteriores.

Num trabalho de Patel *et al.* de 2015, um conjunto de três bobinas de Fitas 2G da SuperOX com um arranjo de ímãs permanentes cilíndricos em CF foi utilizado como mancal magnético radial [64], mostrado na Figura 3.7. Mesmo não havendo continuidade de corrente na direção radial, foi mostrado através de medidas de força e simulações por elementos finitos que há distribuição de correntes na direção axial. Dessa forma, as bobinas fornecem forças restauradoras em resposta ao deslocamento dos ímãs, que alteram a condição de fluxo aprisionado nas camadas supercondutoras. Assim mostraram que bobinas de fitas 2G podem fornecer forças de intensidade comparável a blocos maciços de mesmas dimensões.

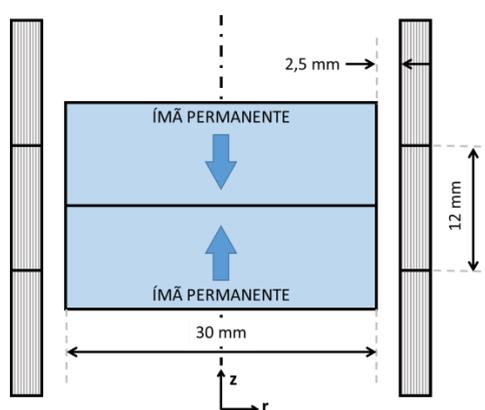


Figura 3.7. Mancal supercondutor radial bobinas de Fitas 2G. Adaptado de [64].

Grupos de pesquisa na Rússia encaminharam em 2016 uma série de trabalhos sobre comportamento da força de levitação fornecida por Fitas 2G empilhadas. Osipov *et al.* avaliaram o comportamento da força vertical em função do deslocamento lateral para várias quantidades (de 10 a 100) de fitas empilhadas [65]. Concluíram que, para pilhas com mais de 40 fitas, a histerese na força de levitação com o movimento é

praticamente desprezível, assim como a relaxação da força se torna linear. Abin *et al.* avaliaram o efeito da relaxação da força vertical com oscilações verticais de várias frequências [66]. Eles observaram que a relaxação da força é menos intensa quanto maior for o número de fitas empilhadas e que frequências inferiores a 30 Hz não causam alteração na taxa de relaxação. Finalmente, Patel *et al.* avaliaram o desempenho de uma placa de 30 mm x 30 mm com 40 segmentos de fitas com um ímã permanente cilíndrico de 25 mm de diâmetro por 10 mm de altura [67]. Obtiveram forças de levitação estáveis e observaram que a histerese da força reduz consideravelmente com a diminuição da temperatura. Além disso, obtiveram um desempenho comparável a um disco de MgB_2 de 43 mm de diâmetro.

Num outro trabalho de Patel *et al.* em 2016, uma pilha de 294 segmentos de fita foi usinada na forma de um anel e utilizada como mancal em conjunto com um concentrador de fluxo radial de ímãs permanentes [68], conforme mostrado na Figura 3.8. Eles mediram forças de levitação maiores de 500 N e ainda identificaram, por modelos de simulação, um superdimensionamento do mancal. É interessante observar que, apesar do maquinário exigido para a usinagem da pilha, essa mudança no plano de orientação das fitas teve um desempenho superior ao observado na mesma geometria no trabalho de 2015 [64].

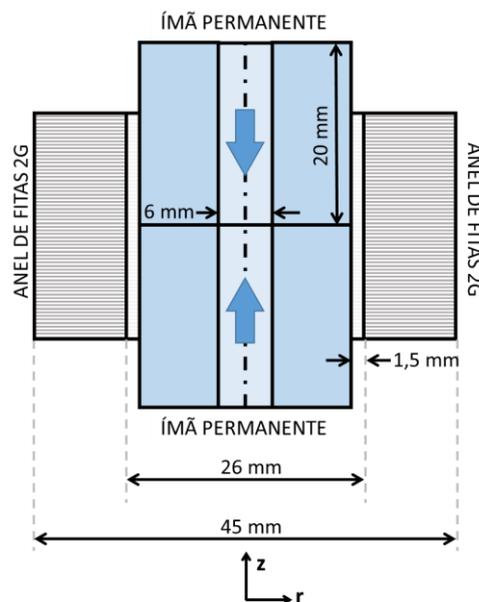


Figura 3.8. Mancal magnético supercondutor radial de Fitas 2G empilhadas. Adaptado de [68].

3.5 Laços de Fitas 2G

Em um trabalho desenvolvido a partir de 2015, Sass e colaboradores [69] apresentaram a ideia do laço supercondutor, que consiste em uma Fita 2G com um corte longitudinal parcial separando-a em duas partes, porém unidas pelas pontas, conforme mostrado na Figura 3.9. O laço permite a indução de um caminho fechado de corrente ao longo do plano AB do supercondutor sem uma emenda resistiva, comportando assim correntes persistentes. Uma bobina desse tipo é composta pelo empilhamento lado a lado de vários laços fechados e pode ser usada como um mancal magnético. Para comprovar isso, neste trabalho são feitas medições de campo aprisionado e força de levitação de uma bobina de 100 laços, chegando a resultados melhores do que os observados no bloco de fitas empilhadas desenvolvido anteriormente [63].

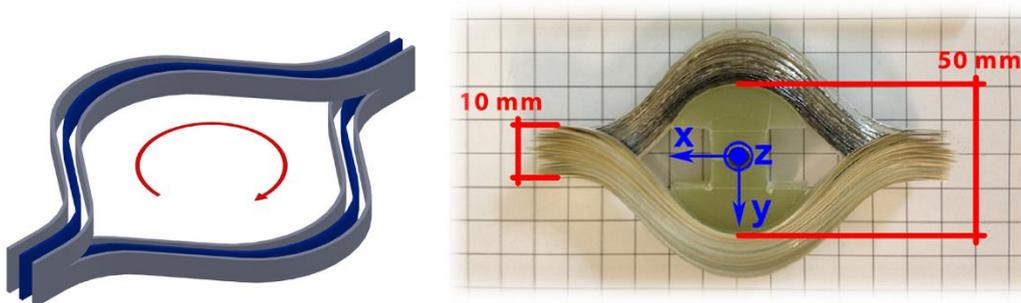


Figura 3.9. Laços de Fitas 2G. Adaptado de [69].

A ideia de aproveitar as Fitas 2G com um corte longitudinal para fazer laços persistentes em mancais magnéticos ainda é inédita em âmbito mundial. Sendo este trabalho desenvolvido no Lasup, esta tese se propõe a dar continuidade à linha de pesquisa, incrementando e aplicando esta ideia.

Neste capítulo foi feita uma revisão bibliográfica de mancais magnéticos supercondutores e abordou-se brevemente os mancais do MagLev Cobra, onde serão utilizadas as bobinas propostas nessa tese. Os laços de Fita 2G empilhados foram a inspiração fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, e no capítulo seguinte, será apresentada a proposta dessa tese, que compreende a melhora na geometria, apresenta a técnica de projeto e construção e sua aplicação no mancal magnético linear do MagLev Cobra.

4 Metodologia

Nesse capítulo será apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa desta tese de doutorado, com suas principais motivações, destacando sua originalidade.

4.1 Limitações do Atual Sistema de Levitação do MagLev Cobra

Conforme explicado anteriormente, o MagLev Cobra é sustentado por blocos maciços de YBCO em criostatos sobre dois trilhos de ímãs permanentes. Desde o início da operação do protótipo em escala real em 2014, algumas limitações foram observadas nessa topologia. Tais questões, abordadas a seguir, motivam o aprimoramento deste sistema de levitação substituindo os atuais blocos maciços de YBCO por Fitas 2G.

Há a dependência tecnológica dos criostatos alemães, que são um produto fechado, de altíssimo valor agregado, que coloca o sistema refém dos interesses e limitações deste fabricante exclusivo. Para a expansão do projeto, acredita-se que a soberania tecnológica seja crucial. Ainda que não haja produtor nacional de Fitas 2G, elas são um insumo, e não o produto final, o que abre uma considerável margem de manobra para a construção de criostatos de levitação brasileiros.

Com relação à força de levitação alcançável pelos blocos supercondutores, foi observado que ela está no limite para a operação do veículo atual, sendo arriscado o aumento do volume de passageiros e equipamentos embarcados. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de um novo arranjo de supercondutores que permita maiores forças de levitação. Acredita-se que a alta qualidade das Fitas 2G possa garantir resultados melhores que os blocos maciços, desde que seja pesquisada uma geometria otimizada.

Os criostatos possuem uma reserva de nitrogênio líquido que dá autonomia de até 12 horas ao veículo em operação, mas ainda assim é um sistema de refrigeração aberto que precisa ser reabastecido. Este processo requer todo um sistema de linhas de distribuição criogênicas e trabalho técnico para ser executado. Isto em somente um veículo de quatro módulos. Para a expansão do projeto, o nível de complexidade de um sistema desse tipo seria altíssimo. Acredita-se que um sistema de refrigeração de ciclo fechado, baseado em refrigeradores criogênicos (*cryocoolers*), com transferência de calor somente por condução em meio sólido, vá garantir autonomia, rendimento e segurança muito maiores à operação do veículo. Inclusive, será possível operar a

temperaturas abaixo de 77 K, aumentando as capacidades das Fitas 2G para que elas superem os blocos maciços, visto que J_c é inversamente proporcional à temperatura.

4.2 O Projeto de um Novo Mancal Magnético Supercondutor: Laços Duplos Cruzados de Fitas 2G

O novo sistema de levitação proposto é inspirado pelo trabalho de Sass e colaboradores intitulado “*Persistent currents in a magnetic bearing with coated conductors*” [69], mencionado no fim do capítulo anterior. Nele, são apresentados os laços de Fitas 2G e são analisados alguns resultados da sua interação com ímãs permanentes. Esta geometria torna possível a construção de espiras totalmente supercondutoras, sem nenhum tipo de emenda resistiva. No entanto, o esquema de bobina proposto nesse trabalho não é o suficiente para a aplicação direta em um mancal magnético supercondutor devido à sua geometria.

Em primeiro lugar, observa-se que essas bobinas de laços não possuem um eixo de simetria, conforme pode ser observado pela Figura 4.1. Isso poderia causar distorções na força de levitação que não são desejáveis. Além disso, essa geometria não considerou um uso otimizado do espaço disponível, de forma que ainda poderia ser colocado mais material supercondutor para aumentar a força de levitação.

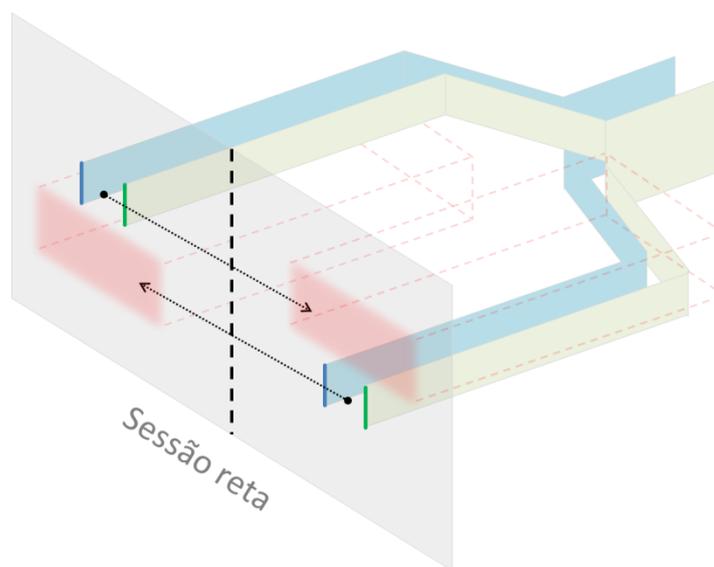


Figura 4.1. Assimetria e espaço não aproveitado em laços de Fitas 2G.

Para corrigir esses problemas, propõe-se nesse trabalho a solução inédita das bobinas duplas de laços de Fitas 2G. Para fazer isso, são necessárias duas bobinas com a mesma quantidade de laços, mas em comprimentos diferentes, de forma que

uma bobina encaixe por dentro da outra. A Figura 4.2 mostra um esquema de como seria uma bobina nesta configuração, batizada de “Laços Duplos Cruzados” (LDCs).

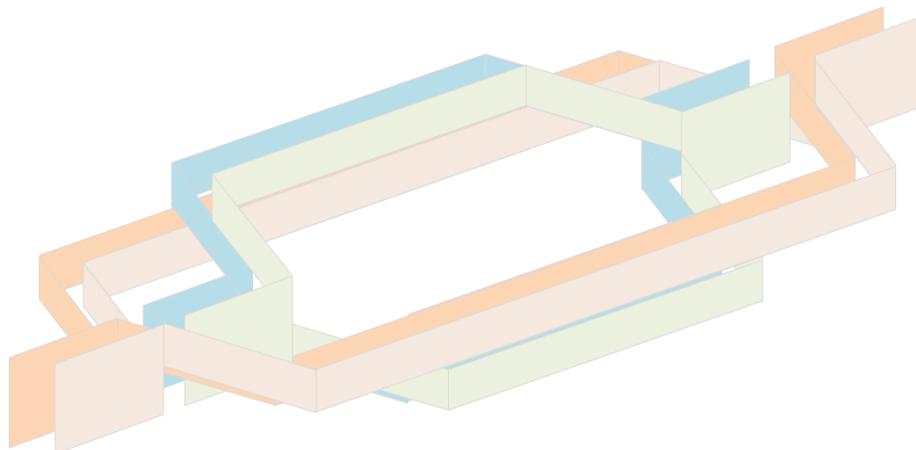


Figura 4.2. Esquema de bobina de dois laços duplos cruzados de Fita 2G.

Os LDCs funcionam da mesma forma que um supercondutor maciço ao aprisionar o fluxo magnético quando submetido a FC. Ele tende a conservar a condição de fluxo enlaçado original e, se deslocado, a variação deste fluxo induz uma corrente supercondutora. Esta se opõe à variação, assim como previsto na Lei de Faraday, induzindo nos laços uma força restauradora. Como o LDC é um caminho supercondutor sem emendas, as correntes induzidas são tão altas quanto permitir a J_c das fitas, possuindo também constante de tempo, em teoria, infinitamente maior que uma bobina com qualquer resíduo resistivo advindo de emendas.

Uma das vantagens desta configuração é que ela é capaz de enlaçar mais fluxo que as fitas empilhadas estudadas em trabalhos anteriores [63-68], de forma que é possível conseguir maiores forças por metro de fita empregado. Isto já foi observado no trabalho anterior com um laço simples [69] e com o LDC as forças são ainda maiores pelo volume maior de Fita 2G utilizado num mesmo espaço. Considerando que, do trabalho anterior em 2015 até agora, as correntes críticas e as capacidades e aprisionamento de fluxo das Fitas 2G comerciais melhoraram consideravelmente, é esperado que os resultados de força de levitação magnética (que advém das correntes induzidas nos laços) obtidos atualmente sejam superiores aos do primeiro trabalho [69]. Mais do que isso, um esforço será feito no objetivo de se, pelo menos, equiparar à força conseguida com os mancais de blocos maciços atualmente em uso, encorajando o desenvolvimento de um sistema de levitação próprio para o MagLev Cobra, independente da tecnologia importada.

Além da ideia do laço em si, nessa tese também é desenvolvida uma técnica de simulação que permita projetar o novo mancal magnético. Através dessas simulações é possível variar os parâmetros de projeto para maximizar a força de levitação na geometria desejada. Estas simulações utilizam as características das Fitas 2G obtidas em caracterizações com campo magnético feitas no Lasup [70].

Outra contribuição deste trabalho é a proposta de uma técnica de montagem dos mancais magnéticos de LDC. Para isso é necessário cortar as Fitas 2G, empilhar os segmentos cortados e encaixar as bobinas. Em seguida, o conjunto precisa ser consolidado para que tenha rigidez mecânica, boa condutividade térmica, e que seja adequado ao ambiente de alto vácuo do criostato.

Por último, o novo mancal passou por ensaios de força de levitação, que foram comparados aos resultados obtidos para os criostatos de blocos. Isso valida a aplicabilidade da ideia proposta. Estes testes são feitos com refrigeração aberta de nitrogênio líquido (77 K).

4.3 Modelagem da Dependência Anisotrópica da Corrente Crítica do Supercondutor com o Campo Magnético

Em aplicações onde múltiplos segmentos de Fitas 2G são utilizados, como cabos ou bobinas supercondutoras, a influência do auto-campo em J_c deve ser levada em consideração, visto que ela afeta significativamente seu desempenho. Mais do que isso, esse efeito é altamente não-linear e anisotrópico, conforme mostrado na sessão 2.6. Na literatura, vários estudos são encontrados acerca da modelagem deste comportamento [19, 32-36]. Como o objetivo deste trabalho é a construção de um mancal magnético passivo à base de Fitas 2G, a correta identificação e modelagem destes efeitos é crucial para um projeto o mais verossímil possível.

4.3.1 Caracterização da Fita 2G

Para obter a curva característica da dependência de J_c com a magnitude e direção da densidade de fluxo magnético, o primeiro passo é a caracterização de um segmento de Fita 2G segundo estes parâmetros. Neste processo, uma amostra é sujeita a pulsos crescentes de corrente contínua enquanto inserida em um campo magnético homogêneo com a magnitude da densidade de fluxo (B) e direção em relação à amostra (θ), controlados, conforme mostrado a seguir. O objetivo deste procedimento é a obtenção de curvas de tensão em função de corrente, conhecidas como Curvas V-I, para cada condição (B, θ) em uma medição de 4 pontas, feita em

trabalhos anteriores no Lasup [70]. Desde que a amostra seja suficientemente pequena e o campo aplicado seja homogêneo, pode-se aproximar a Curva E-J pela Curva V-I a menos das dimensões de comprimento e área de seção reta da amostra, respectivamente.

O aparato experimental feito no laboratório para este procedimento é composto por 2 subsistemas, um de geração de campo magnético (eletroímã) e outro para geração dos pulsos de corrente, controle de posição e aquisição.

O subsistema de geração de campo é composto pelos seguintes componentes:

- Fonte de Corrente Contínua 70 A, 35 V (Modelo: *Lakeshore 662*)
- Eletroímã (Modelo: *Lakeshore EM4-HV*)
- Refrigeração em ciclo fechado a água (*Chiller*, modelo: *Neslab M75*)

O subsistema de aquisição e controle é composto pelos seguintes componentes:

- Nanovoltímetro (modelo: *Keithley 2182A*)
- Fonte de Corrente Contínua 220 A, 8 V (modelo: *Agilent 6671A*)
- Placa de Aquisição (modelo: *National Instruments SCB-68*)
- Sensor de efeito Hall (modelo: *CYSJ106C*)
- Motor de Passo e driver (modelo: *Kalatec KTC-HT23-401*)
- Computador

A Figura 4.3 a seguir ilustra a interconexão entre os equipamentos descritos anteriormente, a Figura 4.4 ilustra com mais detalhes o posicionamento do porta-amostra entre as peças polares do eletroímã e a Figura 4.5 mostra detalhes do porta-amostra.

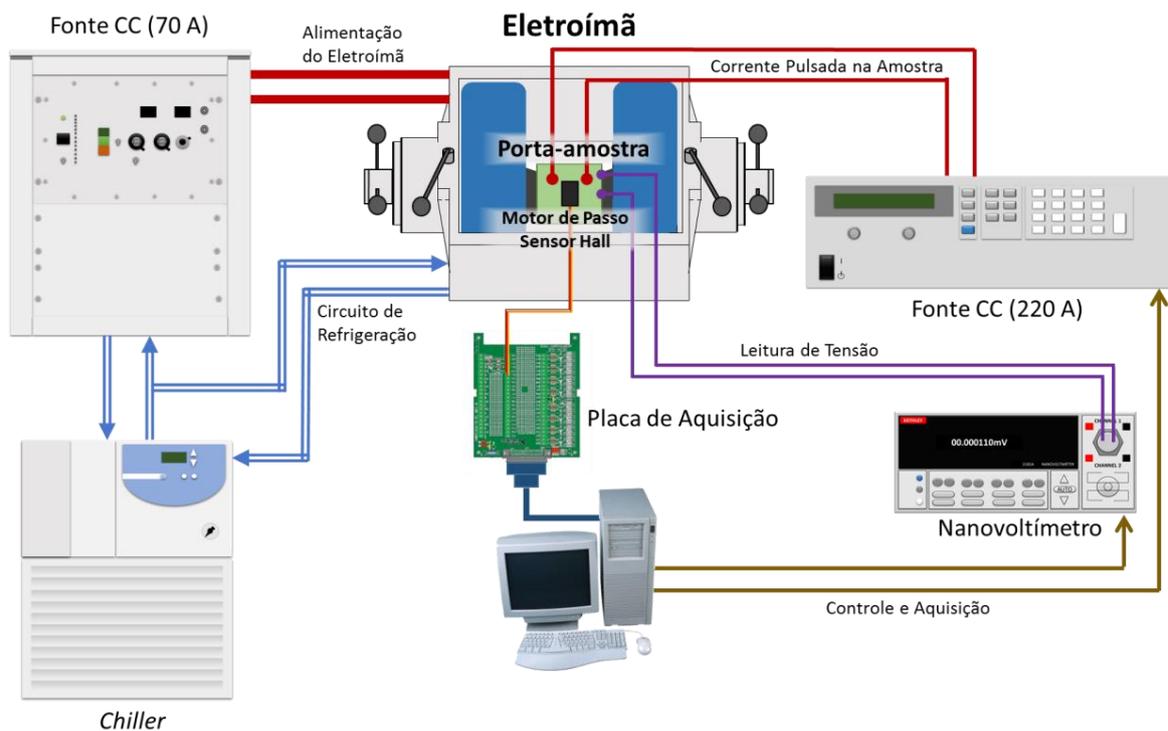


Figura 4.3. Esquema do sistema de caracterização de Fita 2G em campo magnético [70].

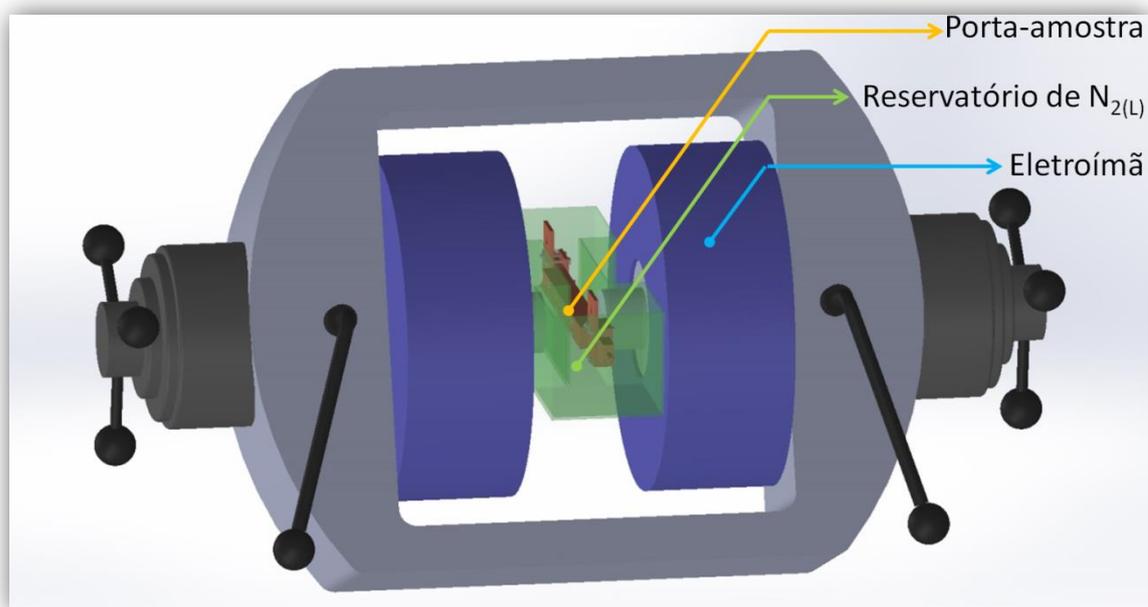


Figura 4.4. Posicionamento do porta-amostra no eletroímã.

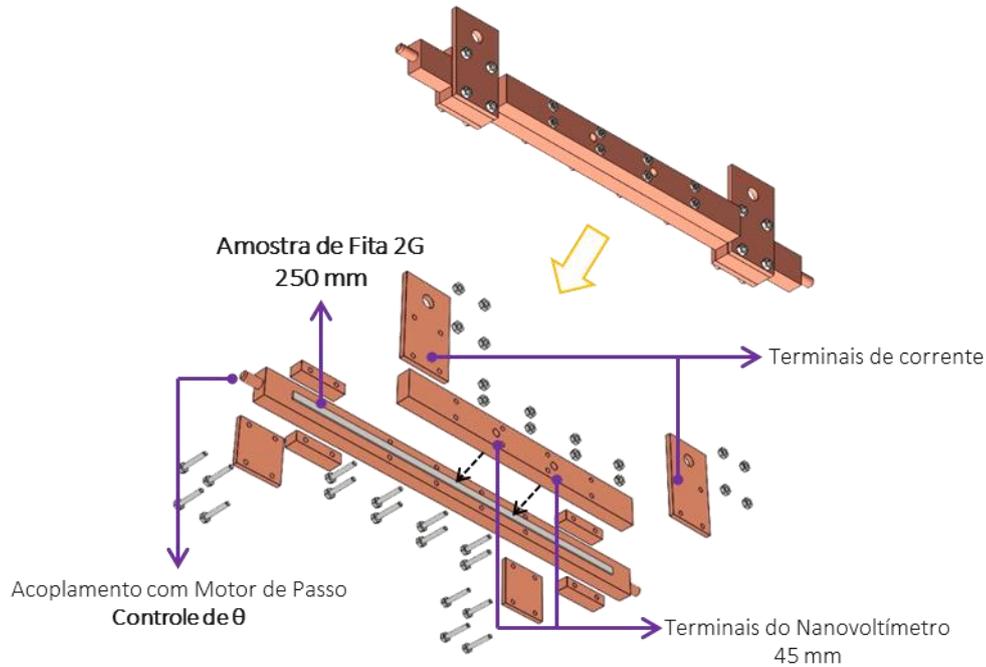


Figura 4.5. Esquema com detalhes do porta-amostra com uma amostra de Fita 2G.

O eletroímã impõe um campo magnético constante e homogêneo sobre a amostra de Fita 2G imersa em nitrogênio líquido. O motor de passo posiciona a amostra em diferentes inclinações em relação ao campo incidente usando como referência a leitura da magnitude da densidade de fluxo advinda do sensor de efeito Hall. A fonte de corrente *Agilent* dá pulsos de amplitude crescente enquanto o nanovôltemetro mede a tensão na amostra, ambos controlados pelo gerenciador de ensaios através de uma interface GPIB. Este programa foi construído especialmente para isso em ambiente *Labview* [70].

Os dados coletados neste sistema são utilizados para escrever a característica de densidade de corrente crítica em função da densidade de fluxo magnético normal e paralelo à superfície da Fita 2G $J_c(B_{\parallel}, B_{\perp})$ a partir das várias curvas $V-I(B, \theta)$. Alguns autores propõem diferentes formas de expressar $J_c(B_{\parallel}, B_{\perp})$ e, neste trabalho, foi escolhida a dependência elíptica proposta por Grilli *et al.* [19], conforme explicado na sessão 2.6 e mostrada em (4.1).

$$J_c(B_{\parallel}, B_{\perp}) = \frac{J_{c0}}{\left[1 + \left(\frac{\sqrt{(kB_{\parallel})^2 + B_{\perp}^2}}{B_c} \right)^b \right]} \quad (4.1)$$

Estas constantes são obtidas através de um algoritmo desenvolvido por Barusco [70] que faz análise combinatória de valores possíveis dentro de intervalos definidos e compara o valor da função-teste com os pontos medidos nos ensaios em busca do mínimo erro médio.

Esta equação característica é utilizada para modelar o supercondutor nas simulações do projeto do mancal, que será descrita a seguir.

4.3.2 Formulação do Problema pelo Método das Equações Integrais

Existem diferentes formulações para a modelagem de mancais magnéticos supercondutores. A partir das equações de Maxwell, o comportamento não linear destes materiais pode ser modelado através da homogeneização de grupos de Fitas 2G utilizando formulação A-V com MDF [21] ou formulação H com MEF [21, 71]. Como alternativa, tem-se a formulação T- Ω [72]. Além destas, há também o método das Equações Integrais (EI) com MEF [73], escolhido para a abordagem deste problema devido ao fato de se obter diretamente como solução a densidade de corrente em cada Fita 2G individualmente, por ser possível analisar como os efeitos de campo magnético alteram localmente o J_c e pela facilidade de se garantir a correta restrição de corrente inerente à geometria. Dessa forma, é possível analisar o projeto com o máximo de detalhamento em cada elemento supercondutor que o compõe, diferente de modelagens homogeneizadas. A sua desvantagem é que ele se aplica exclusivamente a modelos bidimensionais, sendo obrigatório o uso de simetria longitudinal no problema. Dessa forma não é possível representar as cabeças das bobinas com essa modelagem.

Nas Fitas 2G, a razão largura/espessura da camada supercondutora é da ordem de 10^4 . Isso significa que, na implementação convencional pelo MEF, o número de nós na malha faz com que os tempos de simulação aumentem além de valores sustentáveis para computadores pessoais convencionais suportarem [74]. Dentre as soluções já apresentadas para este problema [75-78], uma possibilidade é tirar vantagem desta geometria, tornando-a unidimensional [73]. Neste caso, assume-se que a camada supercondutora da Fita 2G é suficientemente fina para que a sua densidade de corrente $J_z(x,y,t)$ e campo magnético $H(x,y,t)$ sejam constantes ao longo da direção da espessura, como mostrado na Figura 4.6. Os termos x e y são as coordenadas espaciais e t refere-se ao tempo. Dessa forma, $J_z(x,y,t)$ torna-se a densidade laminar de corrente $K_z(x,t)$ de acordo com (4.2) e $H(x,y,t) = H(x,t)$:

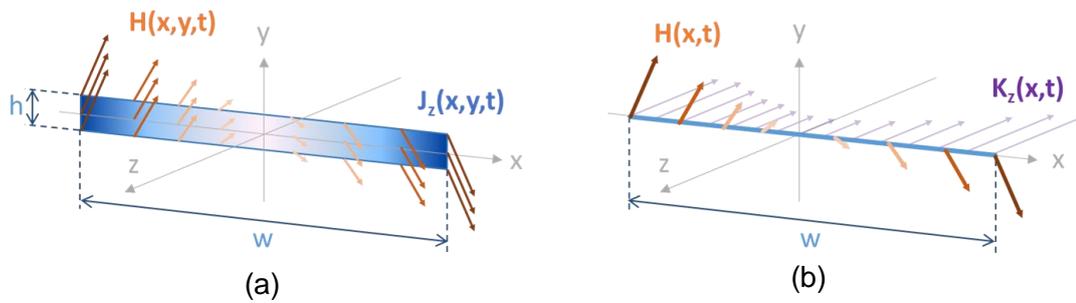


Figura 4.6. Densidade de corrente J_z na sessão transversal de uma Fita 2G (a) pode ser interpretada como uma densidade laminar de corrente K_z (b). Fonte: O próprio autor

$$K_z(x, t) = \int_{-h/2}^{h/2} J_z(x, y, t) dy \quad (4.2)$$

onde h corresponde à espessura da Fita 2G. Para obter a equação integral de $K_z(x, t)$, começa-se definindo o campo magnético $H(x, t)$ na lâmina de corrente supercondutora. Este pode ser dividido em duas partes. O campo externo $H_{ext}(x, t)$ e seu campo próprio $H_{prop}(x, t)$, conforme mostrado em (4.3).

$$H(x, t) = H_{ext}(x, t) + H_{prop}(x, t) \quad (4.3)$$

Com o auxílio da Lei de Biot-Savart, um $dH_{prop}(x, t)$ pode facilmente ser escrito em função de uma lâmina de corrente de largura diferencial du em um ponto arbitrário $x = u$ sobre a extensão longitudinal da Fita 2G (eixo x), conforme mostrado na Figura 4.7. No limite em que $du \rightarrow 0$, $dH_{prop}(x, t)$ possui a mesma formulação que o campo produzido por um fio infinitamente longo na direção z , conforme mostrado em (4.4):

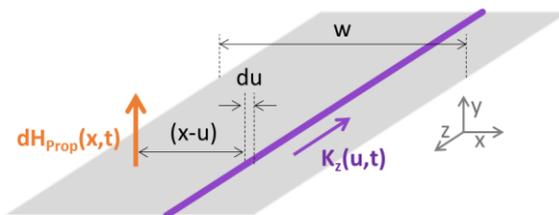


Figura 4.7. Campo magnético H_{prop} expresso por lâminas de corrente de largura diferencial.

$$2\pi(x - u)dH_{prop}(x, t) = K_z(x, t)du \quad , \quad (4.4)$$

o qual integrado ao longo da espessura da fita, de $u = -w/2$ até $u = w/2$, gera a equação integral (4.5):

$$H(x, t) = H_{ext}(x, t) + \frac{1}{2\pi} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{K_z du}{x - u} \quad . \quad (4.5)$$

A partir de (4.5) é possível obter o fluxo magnético $\Phi(x, t)$ por unidade de comprimento l enlaçado entre o ponto $x = -w/2$ e um ponto x arbitrário ao longo da espessura da Fita 2G (4.6):

$$\frac{\phi(x, t)}{l} = \mu_0 \int_{-w/2}^x H_{ext}(\xi, t) d\xi + \mu_0 \int_{-w/2}^{w/2} \frac{K_z(u, t)}{2\pi} \ln \left| \frac{u - x}{u + w/2} \right| du \quad . \quad (4.6)$$

De acordo com a Lei de Faraday, obtém-se o campo elétrico induzido (4.7):

$$E_z(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi(x, t)}{l} \right) = \rho \frac{K_z}{h} \quad , \quad (4.7)$$

que, aplicado em (4.6), leva a (4.8):

$$K_z(x, t) = \frac{\mu_0 h}{\rho} \left[\int_{-w/2}^x \frac{\partial H_{ext}(\xi, t)}{\partial t} d\xi + \int_{-w/2}^{w/2} \frac{\partial K_z(u, t)}{\partial t} \frac{\ln|u - x|}{2\pi} du - \int_{-w/2}^{w/2} \frac{\partial K_z(u, t)}{\partial t} \frac{\ln|u + w/2|}{2\pi} du \right], \quad (4.8)$$

ou simplesmente (4.9):

$$\rho K_z(x, t) = \tau[a(x, t) + b(x, t)] + c(t) \quad , \quad (4.9)$$

Portanto, $a(x, t)$ corresponde às correntes induzidas devido à variação do campo magnético externo, $b(x, t)$ corresponde às correntes induzidas devido à variação do campo próprio e $c(t)$ é uma constante, já que não possui dependência de x , atribuída

à corrente líquida na Fita 2G. Finalmente, $\tau = \mu_0 h$ e ρ é a resistividade não linear do supercondutor, dada pela *Power Law* (4.10):

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1} . \quad (4.10)$$

Neste contexto, J_c depende de B_{\parallel} e B_{\perp} , $J = K_z(x, t)/h$, de forma que (4.10) se torne (4.11):

$$\rho = \frac{E_c}{J_c(B_{\parallel}, B_{\perp})} \left(\frac{K_z(x, t)}{h J_c(B_{\parallel}, B_{\perp})} \right)^{n-1} . \quad (4.11)$$

O termo $J_c(B_{\parallel}, B_{\perp})$ é justamente o resultado da caracterização das Fitas 2G, mostrada na sessão 4.2.1.

4.4 Abordagem do Problema no COMSOL

A próxima etapa é a implementação do modelo matemático que descreve o supercondutor no software de simulação por elementos finitos. Aproveitando a experiência obtida em trabalhos anteriores [71], as simulações serão feitas em COMSOL 4.4. Estas simulações serão usadas para determinar os parâmetros construtivos dos LDCs que darão as melhores forças de levitação.

Como a equação integral (4.8) resolve a densidade de corrente laminar $K_z(t)$ em uma única região supercondutora unidimensional, é necessário que haja um modelo de simulação para cada sessão transversal de Fita 2G utilizada no mancal. A Figura 4.8 ilustra a abordagem do problema com um mancal simples de 4 laços de Fita 2G (2 externos e 2 internos). Para esse caso, são necessárias 8 equações, uma para cada sessão reta de Fita 2G. A correta representação dessa geometria requer uma condição de contorno em que as correntes sejam iguais nos pares de segmentos referentes ao mesmo laço, identificados por cores na Figura 4.8. Essa condição é feita por uma restrição de igualdade entre a integral da densidade de corrente nos pares de segmentos correspondentes, expressas pelas Equações (4.12).

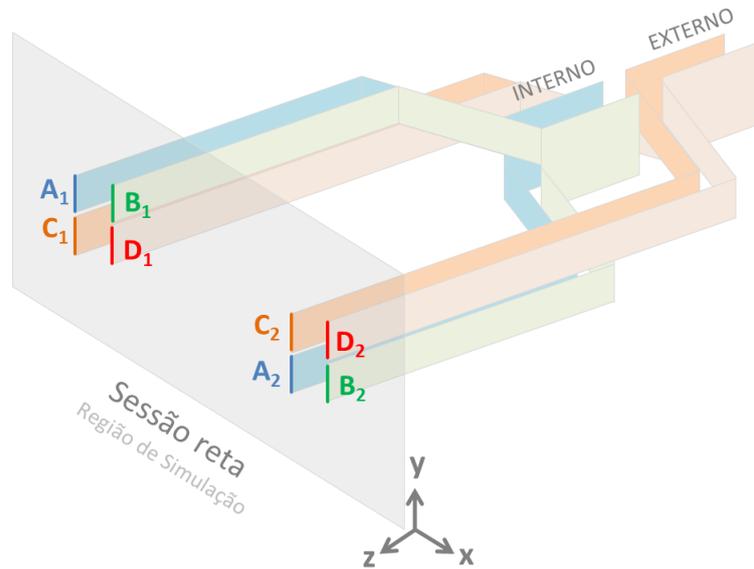


Figura 4.8. Abordagem da simulação de um mancal de dois LDCs para resolver a densidade laminar de corrente K_z em cada fita supercondutora.

$$\begin{aligned}
 \int_{A_1} K_z(y, t) dy &= \int_{A_2} K_z(y, t) dy & \int_{B_1} K_z(y, t) dy &= \int_{B_2} K_z(y, t) dy \\
 \int_{C_1} K_z(y, t) dy &= \int_{C_2} K_z(y, t) dy & \int_{D_1} K_z(y, t) dy &= \int_{D_2} K_z(y, t) dy
 \end{aligned}
 \quad , \quad (4.12)$$

A modelagem proposta na sessão 4.2.2 foi implementada utilizando o módulo *Coefficients form PDE* (uma das opções de modelagem por equações diferenciais parciais do COMSOL) para descrever a Equação (4.9) em cada sessão reta de Fita 2G [21]. Portanto, para cada laço de fita 2G haverá dois modelos de simulação unidimensional inter-relacionados por uma condição de contorno de corrente. A solução de $K_z(x, t)$ é obtida pelo MEF com cada segmento possuindo uma malha uniforme.

Além destes, há também o modelo de simulação bidimensional da sessão reta de todo o conjunto, sendo responsável pela interação magnética entre cada Fita 2G representada. Neste, cada seção de Fita 2G é representada por um segmento de reta com uma densidade de corrente laminar $K_z(t)$. Aqui também são descritos os parâmetros de projeto, como o número de laços cruzados (N), a largura da espira de Fita 2G (L) e a distância entre elas (d), o espaçamento interno (R_i) e entre as camadas (g), representados na Figura 4.9. É importante observar que, devido à restrição de

corrente, este problema não comporta o uso de simetria no plano y-z para simplificação, apesar de ser geometricamente simétrico com relação ao ponto central.

Durante o processo iterativo de solução, cada segmento no modelo 2D recebe a solução da densidade de corrente $K_z(t)$ de sua contraparte 1D através da ferramenta *Linear Extrusion*. Simultaneamente, cada modelo 1D extrai os valores de densidade de fluxo magnético B_{\parallel} e B_{\perp} do modelo geral 2D e os utiliza para a obtenção de $J_c(B_{\parallel}, B_{\perp})$, necessária para a solução de $K_z(t)$. Esta interação entre os diferentes modelos 1D e 2D é ilustrada também pela Figura 4.9. O modelo 2D é resolvido pelo MEF com formulação A-V.

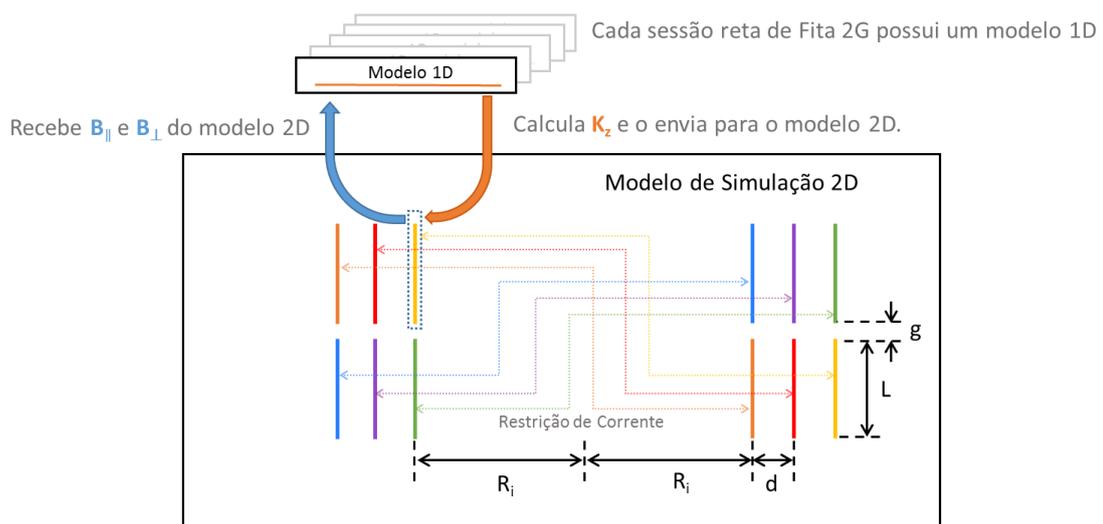


Figura 4.9. Esquema da simulação da sessão reta de um mancal de três LDCs ($N = 3$) com os principais parâmetros da geometria destacados.

Deve-se notar que o termo $b(x,t)$ da equação (4.9) nos modelos 1D é igual a zero. Quando as componentes de densidade de fluxo magnético são importadas do Modelo 2D, elas já carregam a composição de campo magnético tanto das espiras ao entorno quanto do auto-campo. Portanto, se esse termo fosse considerado, seria duplicado.

Um aspecto importante é que essa abordagem não é capaz de simular os efeitos de cabeça de bobina. Dada a complexidade da geometria, somente uma simulação 3D, utilizando outra modelagem que não por equações integrais, seria capaz de modelar corretamente os comportamentos das correntes. Essa modelagem está fora do escopo dessa tese e ficará como um trabalho futuro.

4.5 Projeto e Montagem dos Laços Duplos Cruzados

Uma vez encontrados os parâmetros construtivos que darão a melhor força de levitação através das simulações, a próxima etapa é a de desenhar e montar o conjunto.

Começando pelo desenho, são estabelecidas quais dimensões são fundamentais e quais são dependentes delas. As dimensões principais são: a espessura do feixe (que por sua vez depende do número de Fitas 2G, do espaçamento entre elas e do invólucro de impregnação), a largura da área interna, o comprimento total, comprimento útil, comprimento de borda e o ângulo da cabeça. Elas não podem ser todas fundamentais ao mesmo tempo senão haverá conflito. Na Figura 4.10 a seguir é mostrado como elas são designadas no desenho da bobina. Através de uma plataforma CAD é possível definir relações mestre-escravo entre estas medidas de forma que toda a geometria da bobina se ajuste automaticamente para atender as restrições. Assim, o desenho fica modularizado e de fácil modificação para a evolução do projeto no futuro.

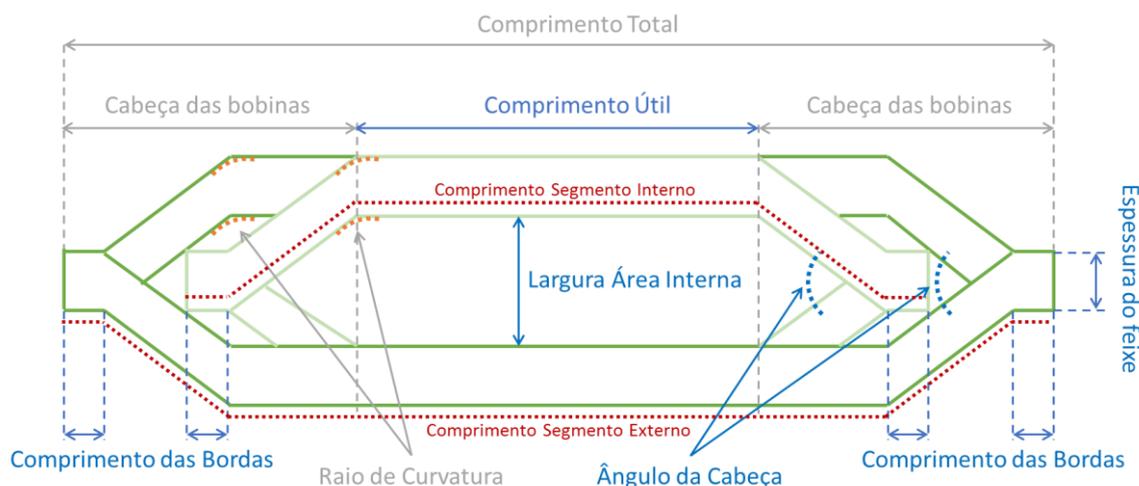


Figura 4.10. Vista superior da bobina de LDCs com destaque para os parâmetros principais do desenho. Em azul são destacadas dimensões fundamentais, das quais todas as demais dependem.

A partir do desenho são determinados os comprimentos dos segmentos dos laços interno e externo e, em seguida, é preciso abrir o corte nas Fitas 2G. Esse é o procedimento mais complicado da montagem devido à sensibilidade das Fitas 2G à tração, pressão, curvatura e ao fato de a maior parte delas ser o substrato metálico. O diâmetro de curvatura mínimo recomendado pelos fabricantes para que a camada supercondutora não frature é de 11 mm. O corte à faca manual é a possibilidade mais simples e prática para produção de laços em pequena escala para os primeiros testes, mas não é possível certificar a qualidade de um procedimento desses para escalas

maiores. No futuro será necessário fazer um estudo de corte a laser para produção em escalas maiores. Outra solução é a de comprar as Fitas 2G já cortadas do fabricante, que possui equipamento específico para isso. Embora resolva o problema por um lado, agrega mais valor ao material e eleva o custo final do mancal. Por isso será vantajoso desenvolver a técnica de corte no futuro.

Após as fitas serem cortadas, os laços são montados, envelopados e acomodados em um molde para a impregnação. Este deve ser o negativo do formato da bobina, conforme ela foi desenhada. Uma opção de baixo custo e fácil execução é utilizar borracha de silicone para fabricar o molde. Para isso, uma peça com as dimensões da bobina também deve ser fabricada em algum material plástico (uma bobina falsa) e imersa na borracha líquida. O silicone cura em questão de horas, retira-se a bobina falsa e o molde está pronto para uso.

A impregnação é essencial para consolidar o conjunto, dando rigidez mecânica e impermeabilização. Além disso, é desejável que também possua boa condutividade térmica. Para isso, optou-se por utilizar impregnação por solda de baixo ponto de fusão inserindo o molde com os laços em uma estufa de temperatura controlada. Após atingir o equilíbrio térmico, o metal é vertido dentro do molde. A estufa é desligada e deixa-se o conjunto esfriar para desmolde.

Uma vez que um par de bobinas esteja pronto, a etapa seguinte é de execução dos ensaios de força de levitação. O ideal seria construir alguns modelos diferentes para que fosse possível avaliar parâmetros como a variação da força com o número de laços, mas por uma questão de disponibilidade de verba para material, só foi feito um único, tentando-se buscar o melhor resultado de simulação obtido para uma dada quantidade de Fita 2G.

4.6 Testes de Força de Levitação

Os testes de força de levitação consistem em variar a distância entre ímã permanente e supercondutor enquanto a força entre eles é medida por uma célula de carga. O resultado obtido é conhecido na bibliografia como “curva banana” devido a seu formato característico e é tradicionalmente usada como figura de mérito da qualidade de um supercondutor. Nessa tese, esses resultados servirão para confrontar os resultados de força obtidos em simulação com o que é alcançável na prática e fazer uma comparação com a força desenvolvida pelo criostato de blocos de YBCO.

Naturalmente, divergências entre estes resultados não são surpresa e poderão ser atribuídas, em uma primeira análise, aos efeitos de cabeça de bobina não computados. Supõe-se que o maior fator influenciador seja a medida do ângulo da cabeça. Para verificar e entender esse efeito, pelo menos a nível quantitativo, o ideal seria fabricar diversas bobinas com diferentes angulações e medir-se a força desenvolvida por cada uma, mas, conforme dito anteriormente, isso extrapola a disponibilidade de recursos do projeto e ficará proposto como trabalho futuro.

O sistema utilizado para a medição de força em função da posição encontra-se disponível no Lasup e já foi utilizado em trabalhos anteriores [69, 71, 79]. Ele consiste em dois grupos de motores de passo com guias lineares, um para movimento vertical e outro para movimento horizontal. Acoplado à parte móvel vertical está uma célula de carga. Para ensaios utilizando o trilho de ímãs permanentes do MagLev Cobra, este é fixado na base enquanto o criostato é preso na célula de carga. A Figura 4.11 ilustra este sistema de medida de força. Os ensaios consistem no deslocamento discreto em passos fixos, geralmente de 1 mm, e serão feitos em condições de ZFC ou FC.

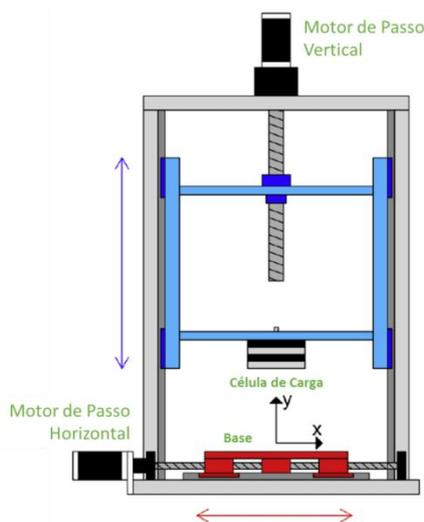


Figura 4.11. Esquema do sistema de medição de força em função do deslocamento vertical e horizontal. Adaptado de [79].

Neste capítulo foram descritas as propostas da tese. Foi mostrada a ideia inédita dos LDCs como uma possibilidade de substituição dos blocos de YBCO atualmente utilizados no MagLev Cobra; uma proposta de técnica de simulação que permita dimensionar mancais magnéticos baseados nesse princípio; um plano de projeto e construção de LDCs; e testes para validar tanto as simulações, quanto o mancal fabricado, em comparação ao existente. No capítulo seguinte serão mostrados os resultados no desenvolvimento do trabalho.

5 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento desta tese. Serão mostrados os resultados da prova de conceito, que motivaram o desenvolvimento dessa pesquisa, a evolução da estratégia de simulação e os dados gerados por ela, a técnica de fabricação dos protótipos e dos ensaios de força de levitação.

5.1 Prova de conceito

Os primeiros testes que mostraram a possibilidade de construir um mancal magnético da forma proposta foram feitos com duas bobinas idênticas de três LDCs cada, em peças de fibra de vidro laminadas com epóxi (G10) e cobertas com fita adesiva. Eles foram construídos em 2015. As dimensões foram escolhidas para ter aproximadamente o comprimento do criostato do Maglev Cobra e metade da sua largura. A Figura 5.1 mostra detalhes dessa primeira montagem.

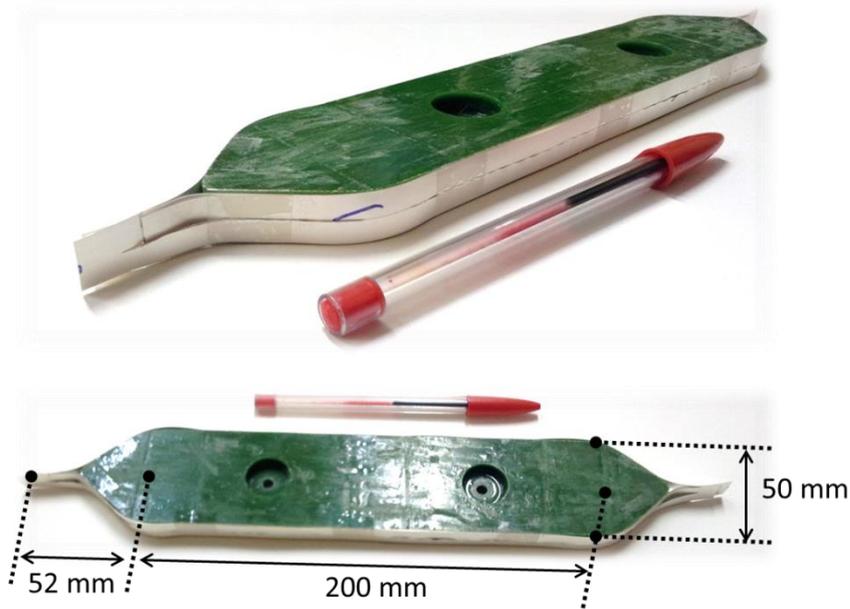


Figura 5.1. Vistas da prova de conceito da bobina de LDC.

As bobinas foram posicionadas alinhadas com os centros concentradores de fluxo magnético do trilho de ímãs permanentes, com a mesma lógica da configuração dos mancais de supercondutores maciços do MagLev Cobra, conforme mostrado na Figura 5.2. Eles foram submetidos a ZFC a 100 mm de altura do trilho, aproximados a 1 mm/s até 20 mm de altura e retornados à posição inicial. A medição da força foi feita por uma célula de carga e a movimentação foi feita por um sistema automatizado de motor de passo controlado por um gerenciador desenvolvido em *Labview*.

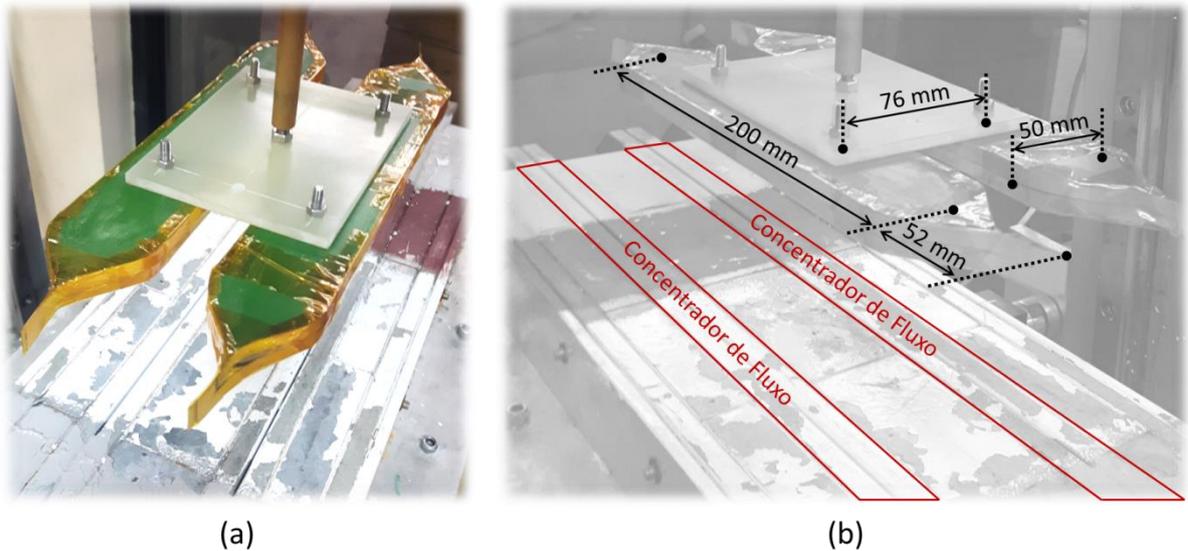


Figura 5.2. Posicionamento das bobinas acima do trilho de ímãs permanentes (a) e principais dimensões dos primeiros LDCs ensaiados (b).

Os ensaios foram feitos para o par de LDCs, assim como na Figura 5.2, e para cada um deles independentemente. Os resultados destes testes de força de levitação em função da posição são mostrados na Figura 5.3. Uma das bobinas (identificada como número 1) sofreu degradação, visto que ela desenvolveu menos de um terço da força da outra. A bobina número 2 foi responsável por praticamente toda a força desenvolvida pelo par: 35 N. Considerando que a Bobina 2 está com o funcionamento adequado, pode-se obter a sua densidade de força por laço: aproximadamente 12 N/LDC. Numa outra aproximação em que toda a força fosse gerada pelos 200 mm de comprimento lateral (desconsiderando as cabeças das bobinas), se obteria 58 N/m/LDC. Se as duas bobinas estivessem íntegras, pode-se estimar que o mancal

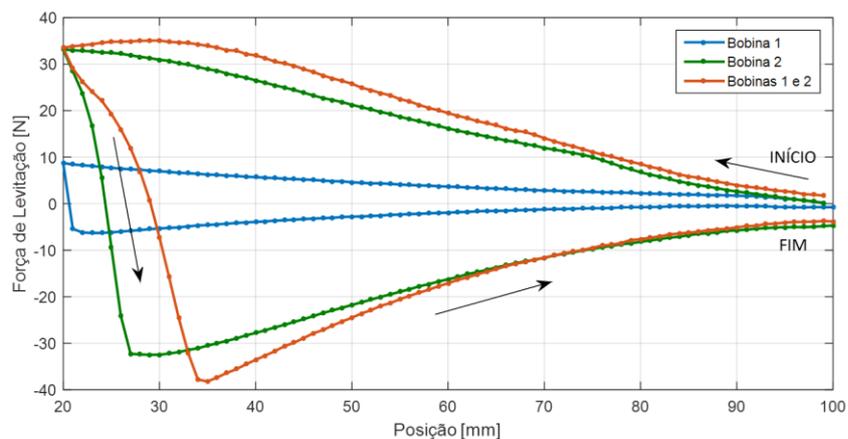


Figura 5.3. Força de levitação em função da posição para os LDCs de prova de conceito.

magnético completo desenvolveria o dobro desta força, ou seja, 70 N, com 117 N/m/LDC . Extrapolando esses dados, para se obter uma força de 2500 N, equivalente à conseguida com os mancais de supercondutores maciços do Maglev Cobra, seria necessário um mancal com duas bobinas de 200 mm de comprimento lateral com 107 LDCs, o que é factível.

Estes valores são primeiras aproximações baseadas em resultados de uma prova de conceito, mas são suficientemente convincentes para motivar o desenvolvimento desta aplicação. Deve-se levar em consideração que este primeiro protótipo foi feito sem qualquer projeto e que, a partir desta tese, este ferramental começa a ser desenvolvido para a obtenção de resultados melhores. Mais ainda, desde a época da prova de conceito até o presente, a corrente crítica das Fitas 2G e sua sensibilidade ao campo magnético melhoraram. Portanto, com fitas atuais se conseguirá maiores forças do que com as utilizadas à época.

5.2 Simulação dos Mancais Magnéticos Supercondutores

A seguir serão apresentados os primeiros resultados para o modelo descrito na sessão 4.3. O objetivo é usá-lo para dimensionar o mancal magnético proposto tendo como parâmetros as curvas de densidade linear de força (N/m) em função da distância entre a superfície inferior da bobina de LDCs e a superfície superior do trilho de ímãs permanentes do MagLev Cobra, conforme mostrado pela Figura 5.4. Procurou-se selecionar o melhor desempenho (em termos de força vertical) através da análise da variação dos parâmetros geométricos do mancal, como o número de laços (N), o espaçamento interno (R_i) e o espaçamento entre espiras (d).

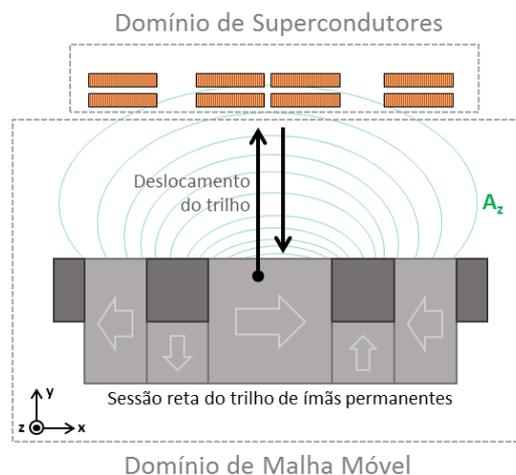


Figura 5.4. Esquema da simulação do mancal magnético supercondutor de LDCs.

O cálculo da densidade de força vertical total do mancal é feito pelo somatório das forças de Lorentz $f_y(t)$ em cada Fita 2G, que por sua vez é dada por (5.1)

$$f_y(t) = \int_0^L K_z(y, t) B_{\perp}(y, t) dy \quad (5.1)$$

em que L é a largura da espira do laço de Fita 2G, sendo igual a 6 mm.

5.2.1 Parâmetros da Simulação

A seguir serão descritos os valores usados nas definições do trilho de ímãs permanentes e das Fitas 2G no COMSOL.

A sessão reta do trilho na simulação foi feito de acordo com as dimensões utilizadas no projeto do Maglev Cobra e são mostradas na Figura 5.5. Cada ímã permanente foi configurado na simulação com sua permeabilidade magnética e densidade de fluxo remanente levando em consideração a direção de magnetização. Eles não foram definidos a partir de um material, mas como um componente *Ampère's Law* (elemento de configuração de magnetização na simulação no COMSOL). Os parâmetros utilizados estão dispostos na Tabela 5.1 e têm origem em trabalhos anteriores do projeto do trilho [60]. Os elementos de aço foram configurados a partir dos dados da biblioteca interna de materiais do COMSOL: *Low Carbon Steel 1020*, e possui sua própria curva BH.

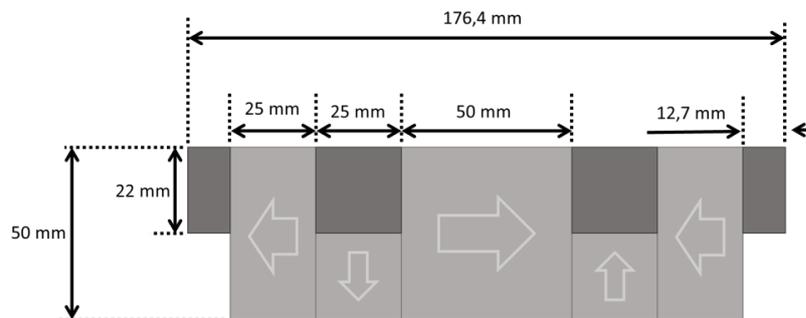


Figura 5.5. Dimensões do trilho de ímãs permanentes do Maglev Cobra usadas nas simulações (adaptado de [60])

Tabela 5.1. Parâmetros utilizados na configuração dos ímãs permanentes do trilho do Maglev Cobra

Parâmetro	Valor
Condutividade elétrica (σ)	0 S/m
Permissividade relativa (ϵ_r)	1
Permeabilidade relativa (μ_r)	1,049
Densidade de Fluxo Remanente (B_r)	1,1 T

As Fitas 2G são simuladas de acordo com a formulação descrita na sessão 4.2.2. Elas possuem parâmetros geométricos referentes às dimensões do empilhamento de fitas no laço, conforme a Figura 4.9, e parâmetros elétricos que descrevem o comportamento da resistividade não-linear através das equações (4.9) e (4.11). Os parâmetros utilizados nas simulações foram obtidos pelo procedimento de caracterização descrito na sessão 4.2.1 para a Fita 2G SCS4050-i-AP, fabricada pela *SuperPower*. Apesar desta não ser a fita utilizada para a construção dos mancais definitivos, seus valores serão utilizados como ponto de partida para ajustar o modelo de simulação. Os parâmetros e seus valores são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Parâmetros utilizados na configuração dos laços de Fitas 2G

Parâmetro	Valor
Largura do segmento de Fita 2G (L)	6 mm
Distância entre as camadas do laço (g)	0,5 mm
Largura interna do laço (R_i)	12,5 mm a 32,5 mm
Espaçamento entre as Fitas 2G (d)	0,2 mm a 1 mm
Campo Elétrico Crítico (E_c)	1 μ V/cm
Densidade de Corrente Crítica em $B = 0$ T (J_{c0})	3×10^{10} A/m ²
Índice de Transição (n)	20
Fator de Anisotropia de J_c (k)	0,6
Coeficiente de amortecimento de J_c (b)	0,4
Densidade de Fluxo de Decaimento de J_c (B_c)	0,04 T
Número de divisões (malha) de cada fita (m)	60

5.2.2 Evolução da Estratégia de Simulação

É natural que o tempo de simulação aumente conforme aumenta a complexidade do problema. Por isso, foi feito um esforço para se acelerar este processo. As primeiras simulações foram feitas como mostra a Figura 5.4. Dentro do domínio principal da simulação 2D havia um domínio de malha móvel com a geometria do trilho e outro fixo com os elementos supercondutores. A malha móvel permite o deslocamento dos elementos em seu interior de acordo com velocidade e trajetória programadas, no entanto, ela traz consigo uma série de problemas de convergência, além de exigir o uso de malha adaptativa que aumenta a complexidade do processo e, conseqüentemente, o tempo de simulação. A Tabela 5.3 mostra os tempos de simulação para os casos mais simples, com poucas espiras e para um deslocamento de 100 mm de aproximação e 100 mm de afastamento, simuladas no computador DELL XPS 8600 (2014), com processador Intel Core i7-4770 3.4 GHz, 16 GB de memória RAM DDR3 e sistema operacional Windows 8.1 x64.

Tabela 5.3. Tempos de simulação utilizando trilho de ímãs permanentes em malha móvel

Número de laços cruzados (N)	Tempo de simulação (horas)
2	01:15:00
5	10:05:00
10	Nunca terminou!

Por estes resultados, nota-se que essa primeira estratégia é inviável para o projeto do mancal com o computador disponível, visto que o objetivo é chegar a algumas dezenas e até centena de fitas. Para acelerar o tempo de simulação, o domínio de simulação foi reduzido e a malha móvel foi retirada. Em compensação, o campo magnético variável no tempo passa a ser imposto pela fronteira relativamente próxima aos supercondutores, e não por um grupo de ímãs em movimento dentro da simulação, o que causa alguma distorção no campo resultante e será analisado mais adiante.

Primeiro, a simulação com malha móvel é executada com o domínio fixo vazio onde estariam os supercondutores. Isso é feito para registrar os valores de potencial vetorial magnético no tempo na fronteira que delimita o domínio fixo, conforme mostrado na Figura 5.6. Esses valores foram registrados em 4 arquivos de texto de acordo com a sua respectiva fronteira: A_{z1} , A_{z2} , A_{z3} e A_{z4} .

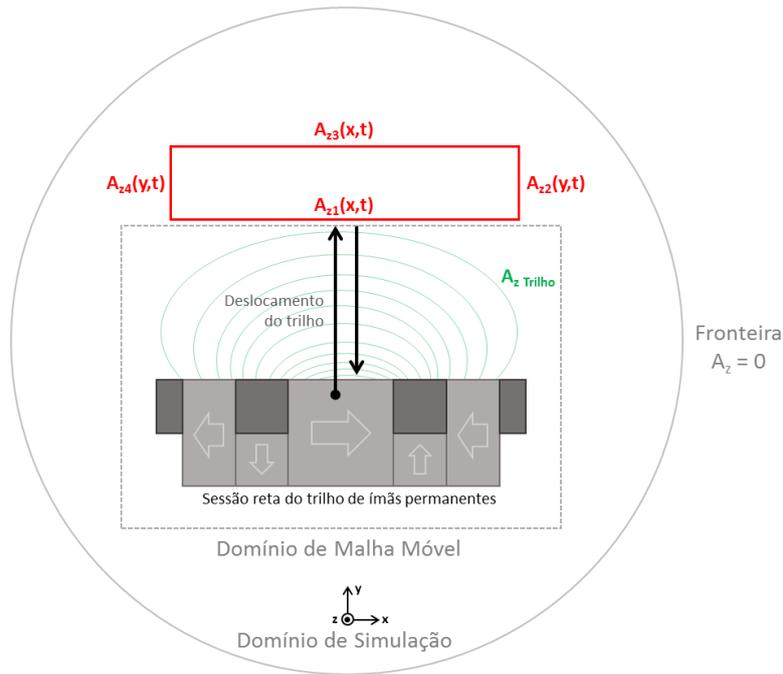


Figura 5.6. Primeira etapa da simulação de domínio reduzido: registro do potencial vetorial magnético

As simulações que contêm os supercondutores são em um domínio de mesmas dimensões do domínio em que foi registrado o potencial vetorial magnético, conforme mostrado na Figura 5.7. Os potenciais gravados nos arquivos de texto são simplesmente impostos nas fronteiras de todas as simulações, desacoplando o problema de deslocamento dos ímãs da solução da densidade de corrente nos supercondutores e diminuindo a carga computacional. Além disso, nesse caso é possível usar simetria para reduzir o problema à metade. Para isso, a região foi dividida ao meio e essa divisão foi configurada como uma fronteira de *condutor magnético perfeito* ao invés do potencial vetorial. Existem dois detalhes inerentes a essa aproximação que devem ser levados em consideração.

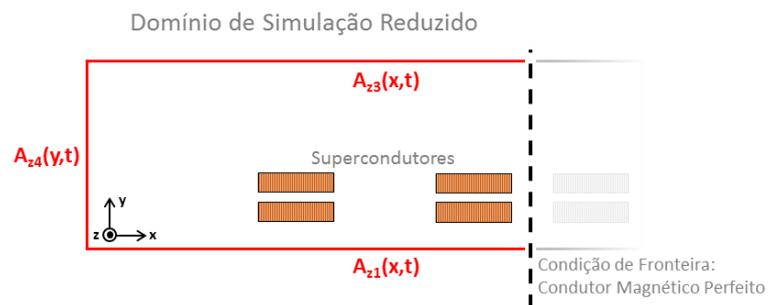


Figura 5.7. Segunda etapa da simulação de domínio reduzido.

Primeiramente deve-se avaliar o efeito de desmagnetização reversível do trilho de ímãs devido ao campo do supercondutor. Pode-se entender desmagnetização como a mudança do ponto de operação na curva $B \times H$ de um ímã permanente devido à influência de um campo magnético externo com sentido oposto ao de magnetização. Ou seja, o campo produzido pelo ímã depende do campo externo aplicado sobre ele. Enquanto este campo variar dentro da região linear da curva $B \times H$ do material, os efeitos de histerese são muito pouco ou não são observáveis, podendo-se dizer que este sofre desmagnetização reversível. A desmagnetização só é irreversível quando o ponto de operação cai dentro da região não-linear e a histerese torna-se relevante. A Figura 5.8 ilustra esta diferença entre as regiões reversível e irreversível em um ímã permanente arbitrário.

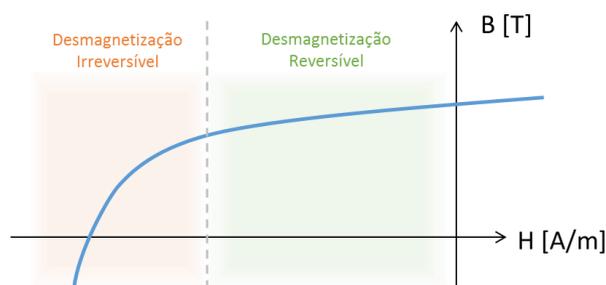


Figura 5.8. Diferença entre as regiões de desmagnetização reversível e irreversível em um ímã permanente arbitrário.

Para os ímãs permanentes de terras-raras comerciais, há variedades em que todo o primeiro quadrante da curva $B \times H$ é caracterizado como uma desmagnetização reversível, conforme ilustrado na Figura 5.9. Este é o caso dos ímãs permanentes usados no trilho do Maglev Cobra. Desta forma, não há como desmagnetizar irreversivelmente estes ímãs pela interação magnética com o mancal proposto, visto que o seu campo induzido jamais será maior em magnitude que o próprio campo do ímã, ou seja, o ponto de operação nunca estará no quadrante inferior. Quando o modelo do trilho na malha móvel deixa de fazer parte da simulação, os efeitos desmagnetizantes são desconsiderados na simulação reduzida. Ou seja, o campo produzido pelo trilho (agora representado pela condição de fronteira) deixa de depender da intensidade do campo produzido pelas correntes do mancal.

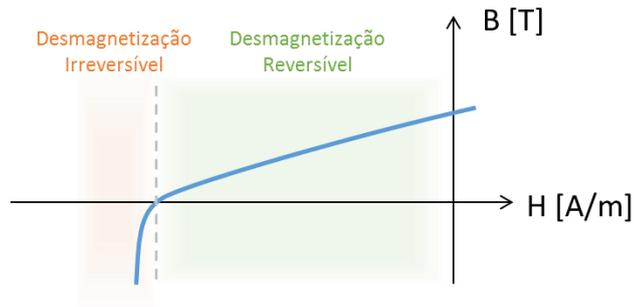


Figura 5.9. Esquema da curva BxH do ímã de terras-raras utilizado na construção dos trilhos do Maglev Cobra.

Em segundo lugar, deve-se considerar o efeito das bordas do domínio de simulação muito próximas aos supercondutores, que podem levar a distorções dos resultados de força induzida. A solução óbvia seria utilizar um domínio com fronteiras suficientemente afastadas, mas isso não apenas aumenta o tempo de simulação, como só é possível em algumas arestas da região, conforme mostrado pela Figura 5.10. Como o domínio de simulação reduzido visa emular o efeito de movimento relativo entre o mancal e o trilho, é preciso que a fronteira entre o trilho e o mancal (aresta 1) esteja o mais próximo possível da mínima distância entre eles, nesse caso de 15 mm. Este valor não é arbitrário: ele considera a espessura da parede de vácuo do criostato (10 mm) e mais 5 mm entre o fundo do criostato e o trilho. A aresta 2 é referente ao eixo de simetria do problema, e não pode ser deslocada. As únicas que possuem grau de liberdade são as arestas 3 e 4. Elas foram variadas pouco a pouco até o ponto em que a força induzida nos laços praticamente não sofria variação por mais que fossem expandidas. Esse marco foi atingido com um domínio de 90 mm de altura por 120 mm de largura.

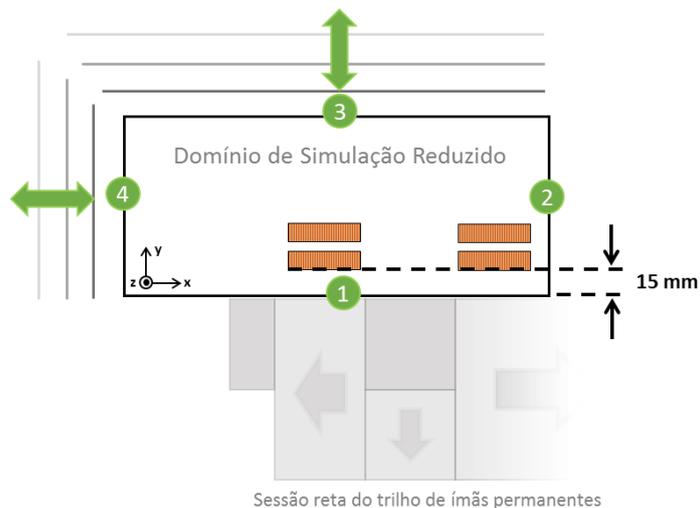


Figura 5.10. Graus de liberdade no dimensionamento do domínio de simulação reduzido.

5.2.3 Resultados das Simulações

Estando o modelo corretamente configurado e gerando resultados coerentes, uma bateria de simulações foi executada em busca de algum padrão de comportamento na força de levitação de acordo com os principais parâmetros de projeto dos LDCs. São eles: o número de laços (N), a distância entre cada camada (d) e o espaçamento interno (R_i).

É preciso lembrar que nestas simulações foram usados os parâmetros de $J_c(B_{\parallel}, B_{\perp})$ obtidos na caracterização da Fita 2G SCS4050-i-AP fabricada pela *SuperPower* em 2012, que é o material disponível no laboratório. Os modelos mais recentes de Fitas 2G comercializadas possuem desempenho superior, especialmente sob a influência de campo magnético, o que é animador. Os mancais de LDCs construídos no futuro certamente terão desempenho melhor que estes primeiros protótipos porque utilizarão Fitas 2G mais modernas, com propriedades e características superiores.

Conforme explicado anteriormente, os resultados são obtidos através dos valores de força vertical em função da distância entre a bobina de LDC e o trilho de ímãs permanentes do MagLev Cobra.

A primeira análise feita é como evolui a força em ZFC com o aumento do número de LDCs para uma mesma geometria ($R_i = 12,5$ mm e $d = 0,2$ mm), mostrada na Figura 5.11. O primeiro detalhe que pode ser facilmente observado é que a força não aumenta linearmente com o número de laços, conforme mostram os valores destacados da força máxima, a 20 mm de altura. Além disso, é possível observar que, conforme o número de laços aumenta, menor é a histerese da força. Pode-se inferir por esses comportamentos que, conforme o número de laços aumenta, menos campo magnético penetra nas regiões mais interiores da pilha de fitas devido à blindagem ao campo do supercondutor. Embora se consiga mais força no geral, menor é o aproveitamento da capacidade supercondutora destas camadas mais internas. O resultado é que a densidade de força por espira torna-se cada vez menor e, conseqüentemente, aumenta a relação de custo para a levitação, conforme mostrado na Tabela 5.4. Ou seja, simplesmente ocupar o máximo de espaço disponível com LDCs não necessariamente trará a melhor relação custo-benefício do mancal. Motivado por isso, os outros parâmetros da geometria serão analisados. Acredita-se que seja possível maximizar a força para um determinado número de laços se for possível melhorar a penetração de campo no interior da pilha de supercondutores.

Tabela 5.4. Força por laço e custo da levitação para diferentes números de LDCs com $R_i = 12,5$ mm e $d = 0,2$ mm.

Custo hipotético do LDC de Fita 2G: 400 US\$/m			
N	Força a 20 mm (N / m)	Força por LDC (N / m / LDC)	Custo da força (US\$ / N)
2	151	75,5	5,28
5	319	63,8	6,28
10	649	64,9	6,16
25	1574	63,0	6,36
50	3014	60,3	6,64
100	4981	49,8	8,04

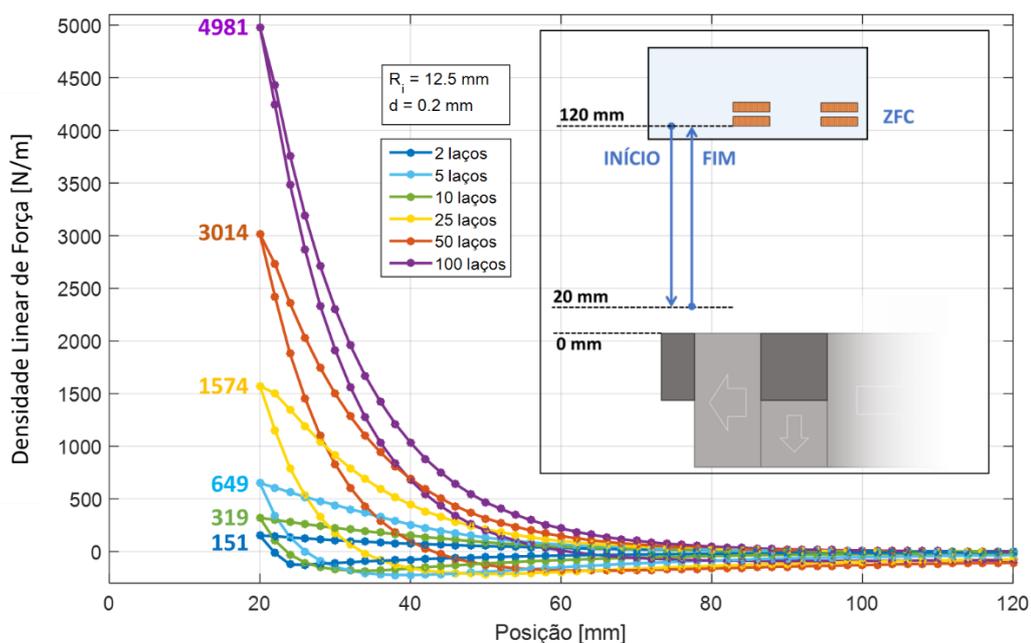


Figura 5.11. Resultados de simulação de densidade de força de levitação em função da distância para bobinas com diferentes números de LDCs em ZFC.

Seguindo essa linha de raciocínio, a análise seguinte foi feita variando-se o espaçamento interno (R_i) para o mesmo número de laços ($N = 25$) e mesma distância entre as camadas ($d = 0,4$ mm). Conforme essa dimensão é aumentada, maior é o fluxo enlaçado pelos laços, portanto, é esperada uma maior força. Estas simulações foram feitas considerando um FC de 50 mm acima do trilho, que é a altura de FC utilizada no MagLev Cobra atualmente. Conforme esperado, houve um aumento na força e, novamente, este aumento não é linear com a variação do parâmetro R_i , conforme pode ser observado na Figura 5.12, tanto pelos valores da máxima

densidade de força quanto pelo leve aumento da histerese. Esta não linearidade leva a crer que existirá um ponto ótimo entre os parâmetros N e R_i para a relação de densidade de força por laço. Sem contar que existe um limite de espaço para o formato dos LDCs, considerando que as dimensões dos criostatos atuais serão respeitadas: quanto maior o R_i , menos espaço terá para adicionar laços. Esse detalhe também deve ser levado em consideração.

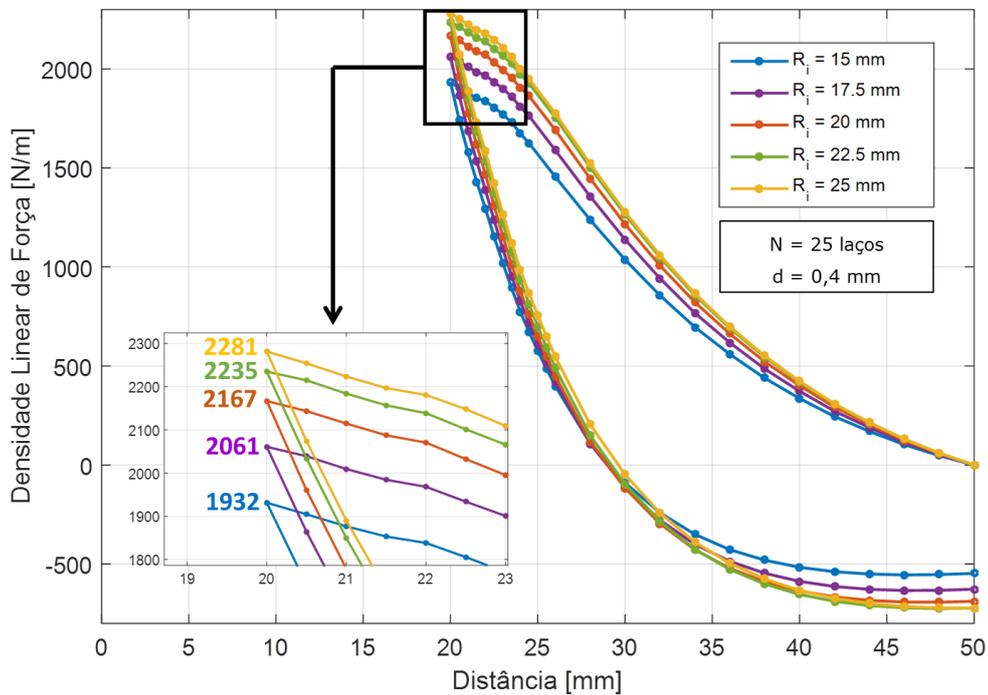


Figura 5.12. Resultados de simulação de densidade de força de levitação em função da distância para bobinas com diferentes R_i em FC de 50 mm.

A terceira análise é da variação da distância entre as camadas (d) para $R_i = 12,5$ mm e $N = 25$ assim como no caso anterior, conforme mostrado na Figura 5.13. É notável o aumento da força conforme se aumenta o afastamento entre as Fitas 2G. Conforme o previsto, pode-se explicar isso pela maior penetração de fluxo por entre as camadas, o que permite uma maior indução de corrente nos laços mais centrais da pilha. É interessante observar a não linearidade do aumento da força com o aumento de d , assim como na análise sobre o aumento de R_i , descrita anteriormente. Isso corrobora a necessidade de uma análise paramétrica em busca de um ponto ótimo de força em função desses parâmetros. Assim como no caso anterior, a variável d conflita com R_i e N quanto à disponibilidade de espaço para os laços e torna o projeto mais complexo.

O aumento da histerese da força foi consideravelmente maior nesse caso do que no anterior. A consequência disso a nível operacional será verificada no futuro, com simulações de ciclos de trabalho na região de operação, próximo ao ponto de força máxima. Embora haja um ganho de força com o aumento de d , também é desejável que o ciclo em torno do ponto de operação seja reversível e esse aumento da histerese pode prejudicar isso.

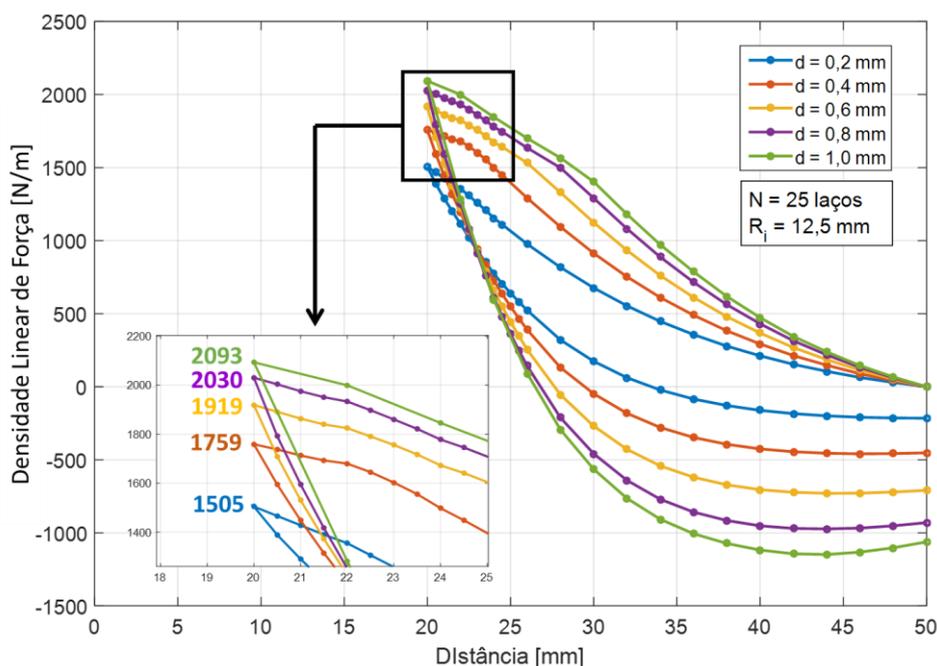


Figura 5.13. Resultados de simulação de densidade de força de levitação em função da distância para bobinas com diferentes d em FC de 50 mm.

Finalmente, podemos concluir por estas breves análises que não é possível projetar o mancal proposto analisando os seus parâmetros construtivos isoladamente, graças às características das forças. Até mesmo por uma questão de custo, visto que o objetivo final é construir um mancal de Fitas 2G competitivo, faz-se necessário um trabalho de otimização para conseguir o melhor desempenho possível. Para isso, é preciso fazer uma análise paramétrica, observando as variáveis simultaneamente, na tentativa de se encontrar a melhor relação custo-benefício.

Este trabalho de otimização do mancal é demorado porque exige várias simulações, uma para cada combinação de parâmetros. A seguir será apresentada uma breve análise deste tipo. No total foram feitas 53 simulações. A combinação de parâmetros é mostrada na Tabela 5.5. Os valores utilizados como resultado são os de densidade linear de força de levitação máxima obtida em cada caso a uma distância de 20 mm entre trilho e bobina, com FC a 50 mm. Lembrando que, devido a limitações de espaço disponível, não é possível fazer todas as combinações possíveis.

Tabela 5.5. Combinações de parâmetros analisados

Parâmetro	Combinações
N	25, 30 e 40 laços
R_i	12,5 mm a 32,5 mm (a cada 2,5 mm)
d	0,2 mm a 1 mm (a cada 0,2 mm)

Na Figura 5.14 é mostrado o resultado desse estudo. Através dele é possível determinar quais são os conjuntos de parâmetros que fornecem as maiores forças de levitação para cada número de laços. Por exemplo, para 25 laços, existem três condições praticamente iguais: $d = 0,6$ mm com $R_i = 22,5$ mm, $d = 0,4$ mm com $R_i = 25$ mm e $d = 0,2$ mm com $R_i = 27,5$ mm. Porém, para $N = 30$ e $N = 40$, existe somente um ponto ótimo para cada: São os trios $N = 30$, $d = 0,4$ mm, $R_i = 25$ mm e $N = 40$, $d = 0,4$ mm, $R_i = 20$ mm. Outro detalhe interessante é que o maior R_i possível não necessariamente dá a maior força máxima quando $d = 0,2$ mm. Acredita-se que isso ocorra por causa da fronteira do domínio de simulação à direita, de condutor magnético perfeito (não há componente de potencial vetorial magnético paralelo à fronteira), que força o campo magnético a não enlaçar completamente essas camadas de fita mais externas. Quando o d aumenta, menos camadas são afetadas pela proximidade à fronteira. Por último, observa-se que, conforme o N aumenta, o ganho de força devido ao aumento de d é mais significativo que no aumento de R_i . Isso é especialmente notável quando $N = 40$, quando a força aumenta em 32 % pelo parâmetro d aumentar de 0,2 mm para 0,4 mm com o mesmo $R_i = 12,5$ mm.

Além dos parâmetros observados, pode ser que, no futuro, outros possam surgir, como por exemplo, a adição de material ferromagnético entre as camadas de Fita 2G, possivelmente aumentando a penetração de campo, mas, em contrapartida, adicionando uma força de atração pelo trilho, não desejável.

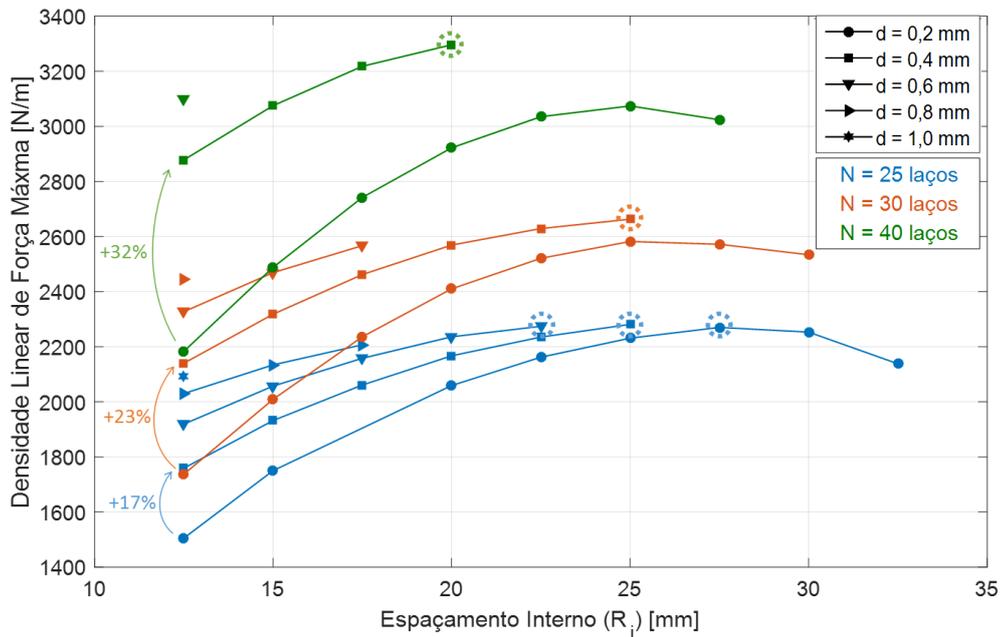


Figura 5.14. Análise paramétrica de N, d e Ri para o projeto otimizado do mancal de LDCs.

Estes resultados das simulações serão comparados aos obtidos na prática e assim o modelo será validado. A seguir será descrito o procedimento de montagem das bobinas.

5.3 Processo de Fabricação das Bobinas

A seguir, serão descritas as etapas do processo de fabricação das bobinas desenvolvido na tese, bem como imagens dos procedimentos para ajudar na sua compreensão. A definição desta técnica passou por várias etapas de tentativa e erro até o estado atual. Aqui serão apresentados os últimos procedimentos desenvolvidos, mas as etapas e os erros cometidos que permitiram chegar até aqui estão descritas em maiores detalhes no Apêndice.

5.3.1 Corte das Fitas

A primeira etapa é cortar as fitas 2G para transformá-las nos laços supercondutores. Os comprimentos dos segmentos dos laços internos e externos foram calculados após a definição das dimensões principais do LDC, conforme mostrado na Figura 4.10. O comprimento do corte é dado pelo comprimento do segmento menos 2 vezes o comprimento da borda. Para esse procedimento foi projetada e montada uma estação de corte a partir de uma guia linear com uma lâmina de estilete. O sistema é rudimentar, mas eficaz para a produção de pequenos protótipos. O segmento de fita 2G é alinhado com a trajetória da lâmina, que é

manualmente forçada para baixo e deslizada contra a fita, abrindo o corte. No centro da guia há um sulco, por onde a lâmina corre quando pressionada, mantendo a trajetória retilínea. A Figura 5.15 mostra a estação de corte e etapas desse procedimento.

Os problemas desse procedimento são o alto risco de erro e o de degradação da fita pelo esforço a que ela é submetida. Há também um desgaste muito rápido da lâmina, visto que ela está sendo usada para cortar aço, e não papel. Isso leva a perda de qualidade no corte em poucas execuções. Para minimizar isso, só um pequeno corte é aberto no estilete, o suficiente para que seja possível fazer a maior parte com uma tesoura. O corte à tesoura é mais limpo que o do estilete, conforme mostrado na Figura 5.16, em que é possível observar que o corte à lâmina é mais irregular, seu entorno possui pequenos vincos e pontas que, a nível microscópico, significam risco de degradação na camada supercondutora, enquanto no corte à tesoura isso não se observa. Apesar de não ser facilmente identificável visualmente, a diferença entre os cortes ao tato é muito grande. O corte à lâmina fica áspero e irregular, enquanto o corte à tesoura é liso e uniforme.

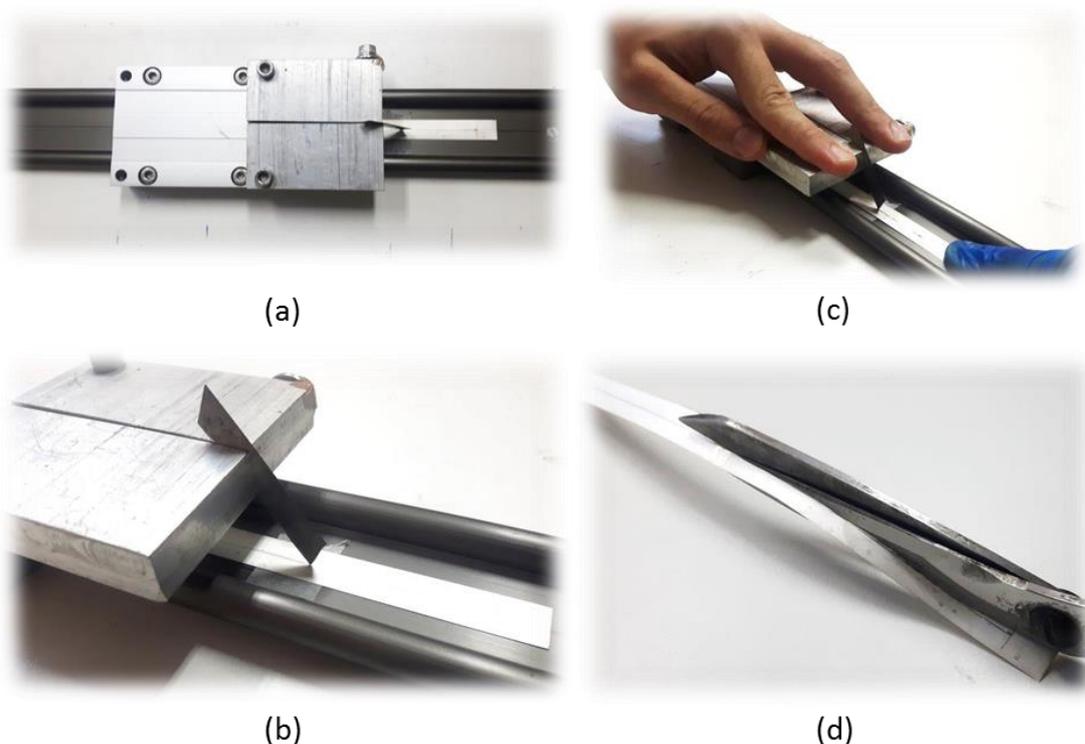


Figura 5.15. Vista superior da mesa de corte (a), Fita 2G posicionada sob a lâmina pronta para corte (b), procedimento de corte manual (c) e finalização do corte com tesoura (d).

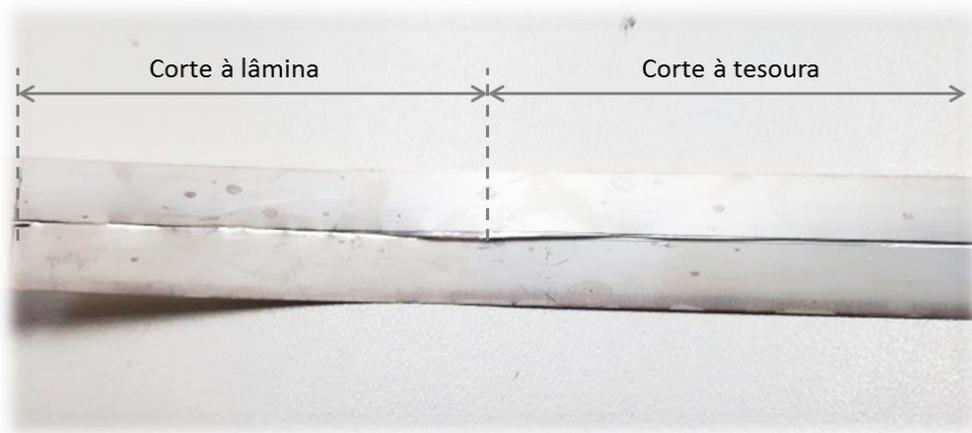


Figura 5.16. Comparação entre o corte à lâmina e o corte à tesoura na Fita 2G.

5.3.2 Amarra e esqueleto da bobina

Antes de acondicionar no molde vasado, é preciso dar coesão ao conjunto de laços, para que se comportem como um objeto único. Do contrário, é difícil de manusear, as fitas deslizam umas sobre as outras e o conjunto fica sem estrutura. Para sanar isso, cada pacote de laços é envolto em fita de teflon. Nesse procedimento, a fita de teflon elástica é tensionada para firmar a pilha de laços, também aderindo às fitas 2G sem risco de amassá-las.

Após amarradas, cada bobina é montada em um esqueleto feito por uma impressora 3D ZMorph 2.0 VX em ácido polilático (PLA). Esse esqueleto serve para dar o formato da bobina, mantendo as fitas presas e centralizadas no interior do molde por aletas laterais. Em protótipos anteriores, foi observado que as camadas mais internas da bobina ficam relativamente soltas e mais sujeitas à degradação por esforço mecânico (mais detalhes no Apêndice). A amarra e o esqueleto ajudam a manter as espiras consolidadas, mesmo se elas se soltarem dentro do invólucro metálico. A Figura 5.17 mostra o esqueleto impresso em PLA e os laços amarrados em teflon.

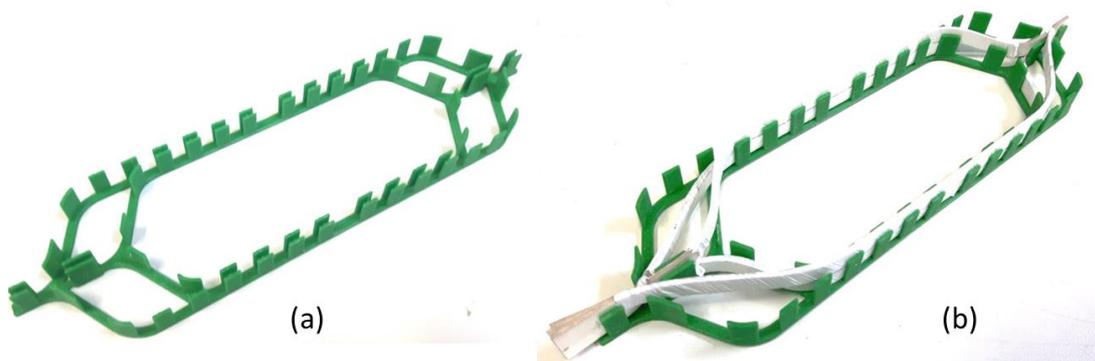


Figura 5.17. Esqueleto da bobina feito em PLA pela impressora 3D (a) e laços envoltos em teflon montados no esqueleto (b).

5.3.3 Fabricação do Molde

O material que se mostrou mais eficiente para a fabricação do molde foi a borracha de silicone líquida com cura e vulcanização à temperatura ambiente, cujas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante estão no Anexo A. Essa técnica é mais rápida e prática que, por exemplo, esculpir o molde com uma fresadora computadorizada (mais detalhes no Apêndice). Pelo fato de o silicone ser flexível, ele também facilita o desmolde da peça. Além disso, a borracha de silicone é um material barato e de fácil acesso no mercado nacional. Para isso, é preciso ter um objeto de formato similar ao da bobina para mergulhar na borracha líquida e fazer o molde negativo dela. A Figura 5.18 mostra a bobina falsa, que foi fabricada em PLA na impressora 3D, para mergulhar na borracha de silicone líquida e obter o molde vasado, o preparo do molde e o molde pronto para uso após a cura. Um detalhe importante é que a borracha contrai cerca de 2 % após a cura, portanto é necessário compensar essa diferença durante o projeto do molde.

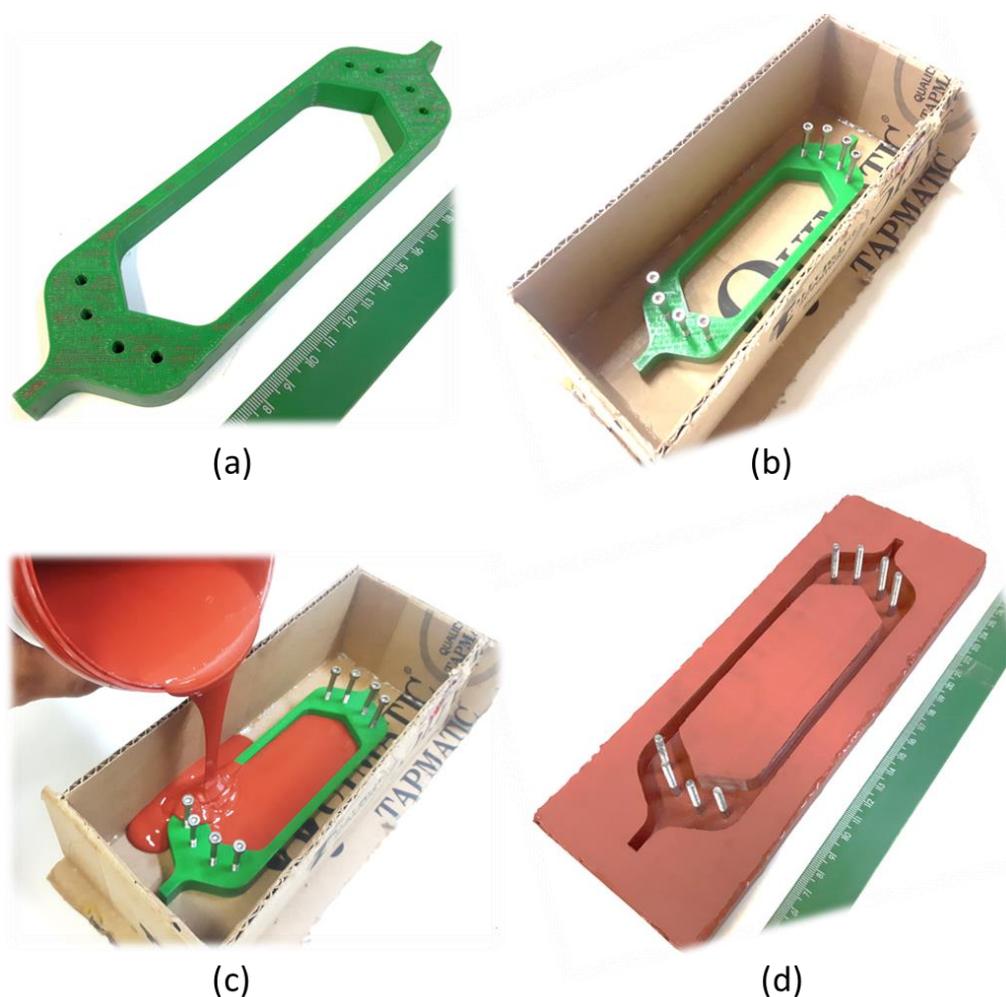


Figura 5.18. Bobina falsa de PLA (a), posicionamento dos componentes para moldagem (b), adição da borracha de silicone líquida (c) e molde finalizado pronto para uso (d).

5.3.4 Montagem da bobina

Antes da impregnação, a bobina é montada no molde vasado. Este procedimento foi desenvolvido pensando-se em submeter as fitas ao menor esforço possível para evitar degradação do supercondutor. Os dois laços envoltos em teflon e encaixados no esqueleto são acomodados dentro do molde. As ilhas, que dão o formato triangular característico da cabeça de bobina, são inseridas e aparafusadas por último. Estas ilhas são fabricadas em nylon pela impressora 3D e ficarão presas permanentemente na bobina após o desmolde, ajudando também a dar sustentação mecânica às cabeças. A bobina montada no molde e pronta para a impregnação é mostrada na Figura 5.19.

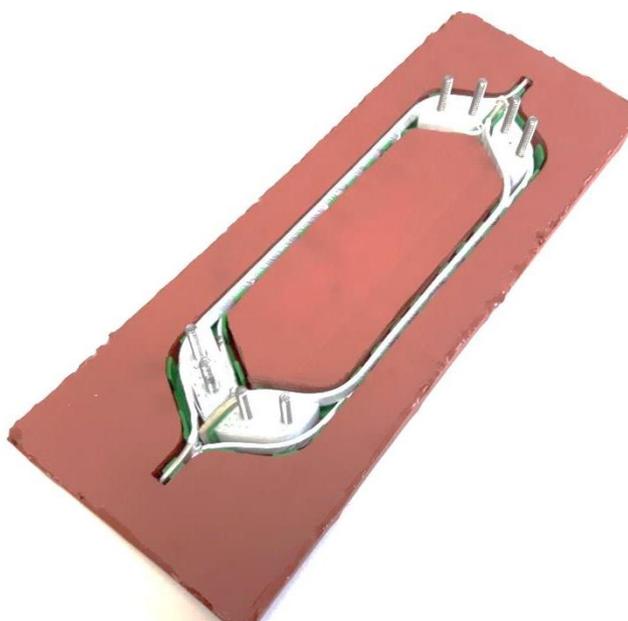


Figura 5.19. Bobina montada no molde, pronta para a impregnação.

5.3.5 Impregnação

O material de impregnação escolhido foi uma liga eutética a base de bismuto conhecida na literatura como Metal de Wood (Bi 48%, Pb 34%, Sn 12%, Cd 6%). Ela possui duas vantagens: a primeira é a de fundir a cerca de 70 °C e a outra é disponibilidade no Brasil a baixo custo (62,00 R\$/kg). Sua ficha técnica, fornecida pelo fabricante, está no Anexo B. A Figura 5.20 mostra algumas das cápsulas de 4,3 g de metal de Wood utilizadas para a impregnação.



Figura 5.20. Cápsulas de metal de Wood utilizadas para a impregnação das bobinas.

No contexto atual de contenção de despesas, o metal de Wood é a opção mais viável. Ao usá-lo para impregnação é preciso se certificar que toda a bobina ficará recoberta, já que foi descoberto que ele não molha a prata e, portanto, não permeia os laços (mais detalhes no Apêndice). É bom também garantir que tudo esteja à mesma temperatura para facilitar a aderência e tentar retirar a umidade. Para isso, decidiu-se fazer a impregnação em estufa com temperatura controlada em cerca de 100 °C.

Atingido o equilíbrio térmico, a liga é vertida dentro do molde e a estufa é desligada, deixando-a retornar à temperatura ambiente de forma natural. O molde frio é então retirado da estufa e a bobina é desmoldada. A Figura 5.21 mostra o metal de Wood fundido sendo vertido dentro do molde na estufa.

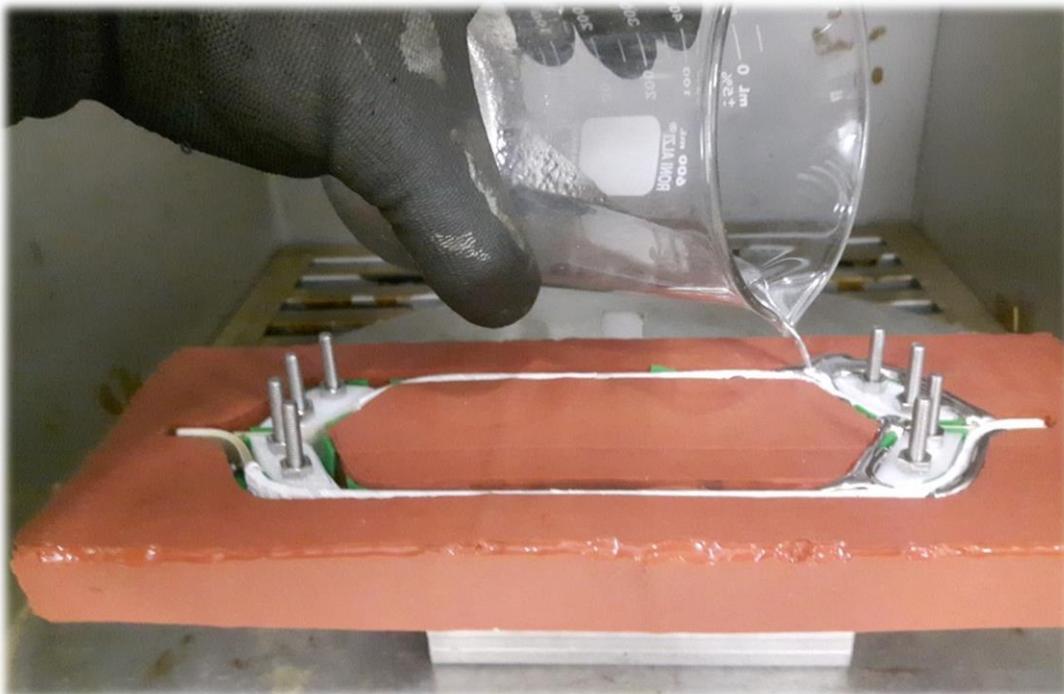


Figura 5.21. Vertendo metal de Wood fundido no molde vasado dentro da estufa.

5.4 Bobinas de LDCs Finalizadas

As bobinas fabricadas para esta tese foram projetadas com parâmetros equivalentes aos utilizados nas simulações mostradas anteriormente. Assim será possível fazer uma comparação direta entre os testes de força deles e os resultados de simulação.

Estas bobinas possuem, cada uma, 25 LDCs. Essa quantidade foi escolhida por uma questão de disponibilidade de material. Seguindo a lógica dos resultados das simulações, foram definidos os parâmetros $R_i = 27,5$ mm e $d = 0,2$ mm. De acordo com a Figura 5.14, esse é um dos casos de máxima força para $N = 25$. A Figura 5.22 mostra as dimensões de projeto da bobina e a Figura 5.23 mostra o par de bobinas finalizadas. No total foram utilizados em cada bobina 25 segmentos de 205 mm de comprimento e 25 segmentos de 240 mm de comprimento, resultando em um consumo de 11,125 m de Fita 2G por bobina.

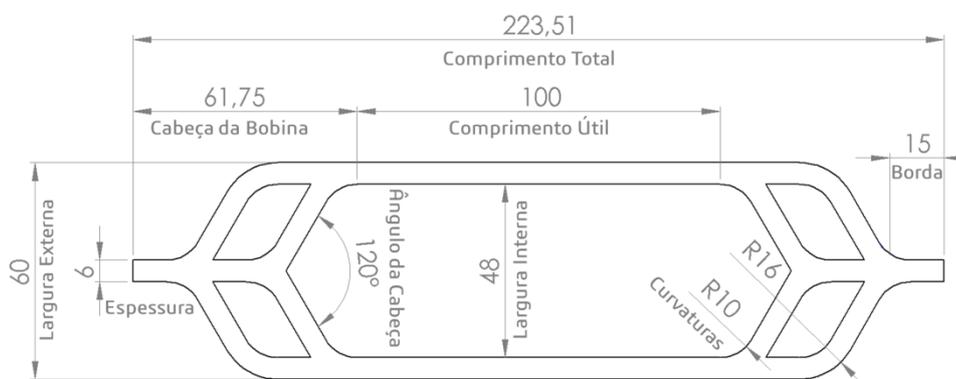


Figura 5.22. Dimensões das bobinas fabricadas.



Figura 5.23. Par de bobinas de LDCs finalizadas.

5.5 Testes de Força de Levitação

Estes testes foram conduzidos de acordo com o que foi explicado na sessão 4.6. As bobinas foram posicionadas alinhadas com o trilho de ímãs permanentes, segundo a mesma lógica da configuração dos mancais do MagLev Cobra, conforme mostrado na Figura 5.24. A Tabela 5.6 numera e resume os diversos testes para facilitar a referência no texto a seguir.

Tabela 5.6. Resumo dos Ensaios de Força Realizados com as Bobinas

Categoria	Número	Altura [mm]		
		H ₀	H _{min}	H _{final}
Caracterização individual	1	100	10	100
ZFC	2	100	10	100
FC de 50 mm variando a altura mínima	3	50	10	100
	4	50	15	100
	5	50	20	100
	6	50	25	100
FC de 50 mm variando a altura mínima <i>flux creep</i> de 10 min	7	50	10	10
	8	50	15	15
	9	50	20	20
	10	50	25	25
FC de 50 mm variando a altura mínima <i>flux pump</i> 10 ciclos de 2 mm <i>flux creep</i> de 10 min	11	50	10-12	10
	12	50	15-17	15
	13	50	20-22	20
	14	50	25-27	25
ZFC Perpendicular	15	100	10	100
FC de 50 mm Perpendicular	16	50	10	100
FC de 50 mm + <i>flux creep</i> 10 min Perpendicular	17	50	10	10

Alguns resultados das medidas serão comparados aos seus equivalentes simulados com o modelo desenvolvido nessa tese. Dentre as várias simulações apresentadas na sessão 5.2.3, a que se aproxima das bobinas construídas é a que possui os parâmetros $N = 25$, $r_i = 27,5$ mm e $d = 0,2$ mm. Os resultados das

simulações são dados em N/m e foram adaptados ao caso prático, em que as bobinas possuem comprimento útil de 100 mm, sendo divididos por 10. Algumas medidas de força dos LDCs também serão comparadas às medidas de força do criostato do MagLev Cobra, para que se tenha noção do quão próximo se está do objetivo da substituição dos blocos por bobinas de LDCs para levitação do veículo.



Figura 5.24. Posicionamento das bobinas em relação ao trilho de ímãs permanentes para os testes de força números 2 a 14.

5.5.1 Testes de Caracterização das Bobinas

O teste número 1 é a medida em ZFC da força de somente uma bobina por vez (batizadas de A e B) alinhada com um dos concentradores de fluxo do trilho de ímãs permanentes. Esse teste é para saber se existe alguma diferença entre as forças desenvolvidas por cada bobina e avaliar se ocorre degradação com o tempo. Ele foi repetido em um intervalo de 12 dias. A Figura 5.25 mostra os resultados. É possível observar que houve diferença significativa na força desenvolvida por cada bobina, o que não era previsto. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de terem sido usados dois lotes diferentes de fita para a fabricação de cada uma. É possível que o primeiro lote tivesse uma corrente crítica superior ao segundo. Outra possibilidade é

que tenha havido algum descuido no manuseio dos laços na montagem da segunda bobina, de forma que as camadas supercondutoras tenham sofrido mais degradação por esforço mecânico (possivelmente nas quinas dos cortes, nas cabeças da bobina, que são as partes mais frágeis). Nesse caso é impossível ter certeza sobre onde foi o problema, mas é uma questão inerente a um processo criado recentemente. Isso reforça a necessidade do aperfeiçoamento da técnica de construção. Quanto maior a padronização deste processo, menores serão as chances de falhas do tipo no futuro. Quanto à degradação, observa-se que estas bobinas praticamente não sofreram variação nas suas curvas de força durante um intervalo de 12 dias, após serem submetidas a toda bateria de testes e ficarem armazenadas em um recipiente com sílica gel. A tentativa de estruturar as fitas dentro do invólucro metálico ajudou a evitar a degradação por esforço mecânico que ocorreu em protótipos anteriores (maiores detalhes no Apêndice). O acompanhamento periódico das bobinas deve ser feito no futuro para que haja certeza de que o invólucro metálico evita contato das fitas com o ar atmosférico, o que causaria sua degradação com o tempo, mesmo guardada e sem passar por testes.

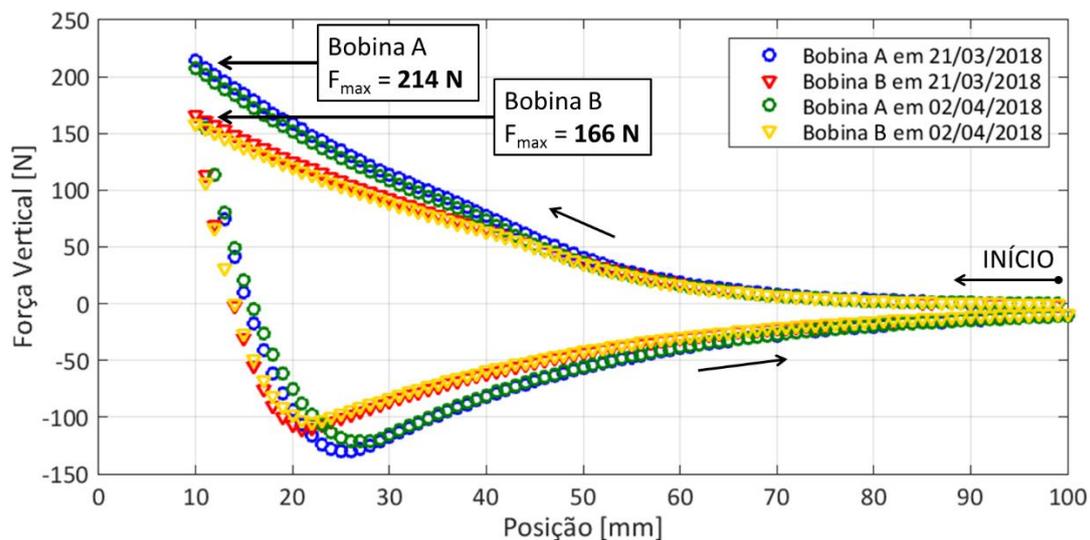


Figura 5.25. Resultados dos testes número 1.

5.5.2 Testes Estáticos de Força: ZFC e FC a 50 mm

O teste número 2 é a medida de ZFC do par de bobinas. Elas partem de uma altura de 100 mm da superfície do trilho, descem em passos de 1 mm até uma altura de 10 mm e retornam para a altura original. Os testes números 3 ao 6 são medidas de FC do par. Elas partem de uma altura de 50 mm (que é a altura de FC utilizada no MagLev Cobra), descem em passos de 1 mm até diferentes alturas mínimas (variando de 10 mm a 25 mm) e sobem até 100 mm de altura. Os resultados desses testes são

mostrados na Figura 5.26. Deve-se ter em mente que estas curvas dão uma boa primeira ideia da força máxima desenvolvida pelo mancal e da sua histerese, mas não são suficientes para a definição de características e projeto. Isto porque estas curvas são medidas quase-estáticas e não refletem as dinâmicas do sistema de levitação magnética, que causam variações na força de levitação ao longo do tempo.

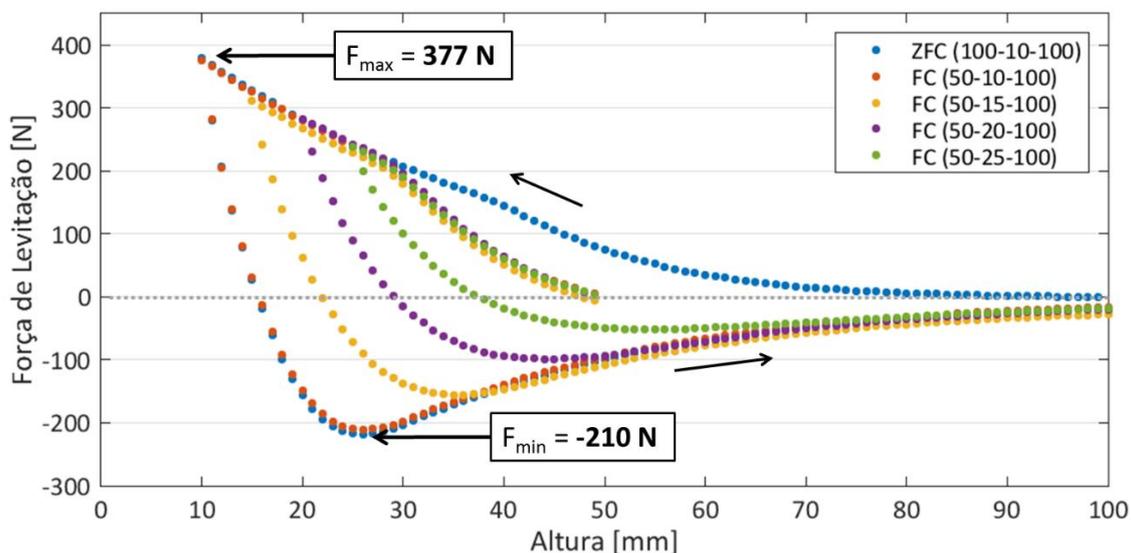


Figura 5.26. Resultados dos testes números 2 a 6.

O primeiro detalhe interessante dessas curvas é o fato de a força máxima atingível ser a mesma em ZFC ou FC. Isso é surpreendente porque nos mancais de bloco maciço de YBCO a força máxima diminui com a altura de FC: quanto mais próximo ao trilho o resfriamento, menor a força vertical e maior a estabilidade lateral.

O segundo detalhe que chama a atenção é a histerese da força no retorno, o que não é benéfico para a operação como mancal magnético. Considerando que, durante a operação, a altura do veículo tende a oscilar tanto pelo embarque e desembarque de passageiros quanto pela própria dinâmica do conjunto em movimento, uma grande variação da força em torno do ponto de operação levaria à perda muito rápida da altura estável de levitação. Esse comportamento é característico de um supercondutor em filme fino, que é o caso das Fitas 2G, devido à penetração do campo magnético, e pode estar associado, inclusive, ao fato de a força máxima independe da altura de FC. Conforme foi apresentado na sessão 5.2.3, especialmente na Figura 5.11, em que se nota que quanto maior o número de laços na bobina, menor é a histerese. Mais parecida com a resposta de um bloco maciço a bobina se torna.

O terceiro aspecto é a mudança do comportamento de subida da curva de força em cerca de 30 mm: ela vem em um aumento não-linear e passa a ser quase-linear até a altura mínima. Esse comportamento é o mais interessante dos três, já foi observado no primeiro trabalho de laços supercondutores [69] e é o mais difícil de se explicar. Uma possibilidade é a mudança da corrente crítica das fitas de acordo com a proximidade com o campo magnético. Conforme a bobina é aproximada do campo magnético, a corrente induzida surge primeiramente nas camadas mais externas da pilha de laços. Conforme se aproximam da corrente crítica, as camadas mais internas começam a sofrer indução. Porém, a corrente crítica também depende do campo magnético incidente. Conforme as bobinas são aproximadas do trilho, corrente é induzida nos laços mais internos, aumentando a força, enquanto os laços mais externos mantêm a corrente que já havia sido induzida nos primeiros instantes. Se a proximidade com o trilho causar uma redução na corrente crítica, esses laços externos passariam a apresentar perda (devido à corrente crítica passar a ser menor que a induzida) e, conseqüentemente, uma queda na corrente até um valor estável abaixo do novo ponto crítico. Com isso, pode-se explicar os dois estágios da força induzida. No primeiro momento (entre 50 mm e 30 mm) a corrente é induzida nas camadas mais externas e ocupando as mais internas conforme a proximidade aumenta, notando-se um incremento não-linear crescente na força. No segundo momento (entre 30 mm e a altura mínima), continua o aumento da corrente induzida nas camadas mais internas, porém há diminuição da corrente crítica nas mais externas, levando a uma leve diminuição na sua corrente induzida e na contribuição para a força total. Com isso, o incremento de força muda para um mais suave, quase-linear. Esta hipótese pode ser validada através de simulações variando a sensibilidade da corrente crítica ao campo magnético.

A Figura 5.27 compara os resultados medidos aos simulados. O teste que possui movimentação similar à utilizada em simulação é o número 5. É interessante notar que as bobinas construídas fornecem maior força que o previsto em simulação. Uma razão é o fato de as cabeças de bobina não serem consideradas no modelo, enquanto que na prática elas contribuem para a levitação. Outra questão interessante é que, na simulação, a mudança de tendência da curva ocorre muito mais próxima à altura mínima que na prática. Seguindo a teoria de que esse efeito ocorre devido à diminuição da corrente crítica devido ao campo magnético, se os parâmetros da curva $J_c(B_{||}, B_{\perp})$ forem alterados de forma a aumentar a sensibilidade, é esperado que esse comportamento se aproxime ao observado na prática. Uma série de outras simulações foram feitas com o objetivo de adequar o modelo de simulação ao observado na

prática. A curva de força com o melhor resultado dessas tentativas também se encontra na Figura 5.27. Os parâmetros alterados que a geraram foram os destacados na Tabela 5.7. Mais do que simplesmente reproduzir a força máxima, é mais importante reproduzir a forma da curva de força. Para analisar melhor isso, as curvas simuladas foram multiplicadas por um fator para que hipoteticamente coincidisse com a força à altura mínima: 1,24 para a simulação original e 1,80 para a simulação ajustada. A curva da simulação original multiplicada por 1,24 não consegue reproduzir bem a forma da curva de força medida.

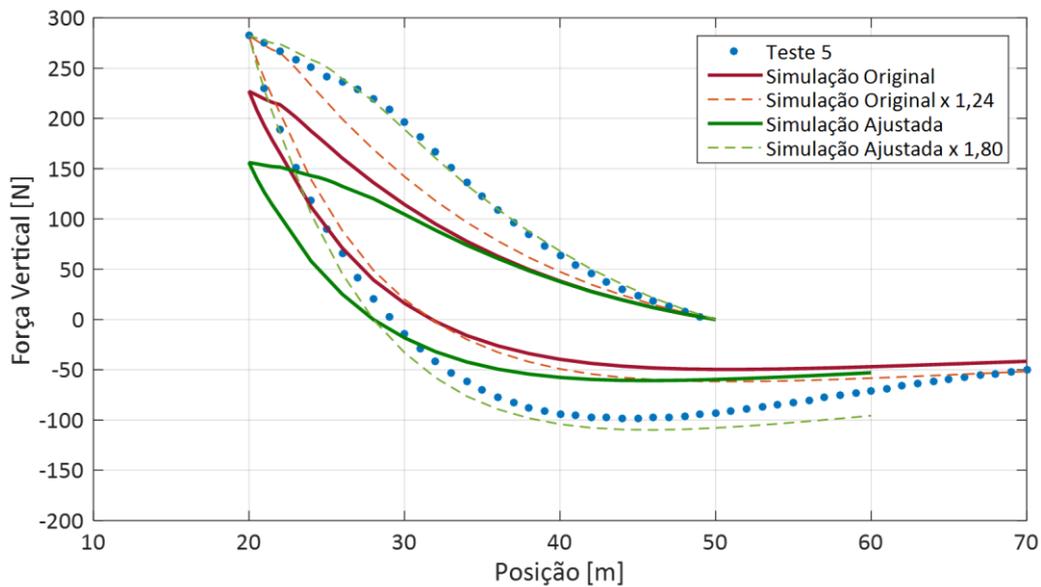


Figura 5.27. Comparação entre valores medidos no teste número 5 e simulados.

Tabela 5.7. Parâmetros alterados para tentativa de ajuste do modelo à prática

Parâmetro	Original	Ajustado
J_{c0} [A/m ²]	3×10^{10}	6×10^{10}
k	0,6	0,6
B_c [T]	0.04	0,01
b	0,4	0,6

De fato, ao aumentar a sensibilidade de J_c com o campo magnético, a curva de força apresenta um aspecto bem mais próximo do observado na prática. As curvas de força medida e da simulação ajustada multiplicada por 1,80 praticamente se sobrepõem. Esta é uma boa comprovação da teoria de que a mudança da tendência da curva está associada à sensibilidade da densidade de corrente crítica com o aumento do campo magnético. No entanto, não foi possível encontrar um conjunto de

valores que permitisse reproduzir fielmente o resultado medido e isso ficará para trabalhos futuros. Ainda assim, os passos dados até esse ponto são importantes para definir o caminho a ser investigado.

Para comparar a força de levitação das bobinas com a do criostato original, é importante levar em consideração a questão da escala: o criostato original é muito maior e possui muito mais área de atuação sobre o campo magnético que as bobinas. Comparando simplesmente a força em termos absolutos, conforme no primeiro gráfico da Figura 5.28, tem-se que um criostato é capaz de fornecer uma força cerca de cinco vezes maior à distância mínima, além de apresentar histerese consideravelmente menor. Agora, a mesma comparação é feita, considerando somente as áreas efetivamente ocupadas por supercondutor: 492 cm² para o criostato original e 218,3 cm² para o par de bobinas (considera-se a área interna da bobina como sendo ocupada, embora na realidade seja livre). Nesse caso, a pressão vertical exercida por cada um é mostrada no segundo gráfico, onde o criostato de blocos exerce uma pressão de 2,5 vezes a das bobinas. Deve-se lembrar que somente 25 laços foram utilizados (há espaço para algumas vezes essa quantidade) e que as bobinas possuem 225 mm de comprimento, quando o criostato tem 380 mm. Dadas as devidas proporções, este primeiro protótipo funcional possui um comportamento bem satisfatório frente ao criostato de blocos (que já é um produto finalizado). Com a adição de mais laços, o aumento do comprimento das bobinas e otimização do projeto, será possível superá-lo.

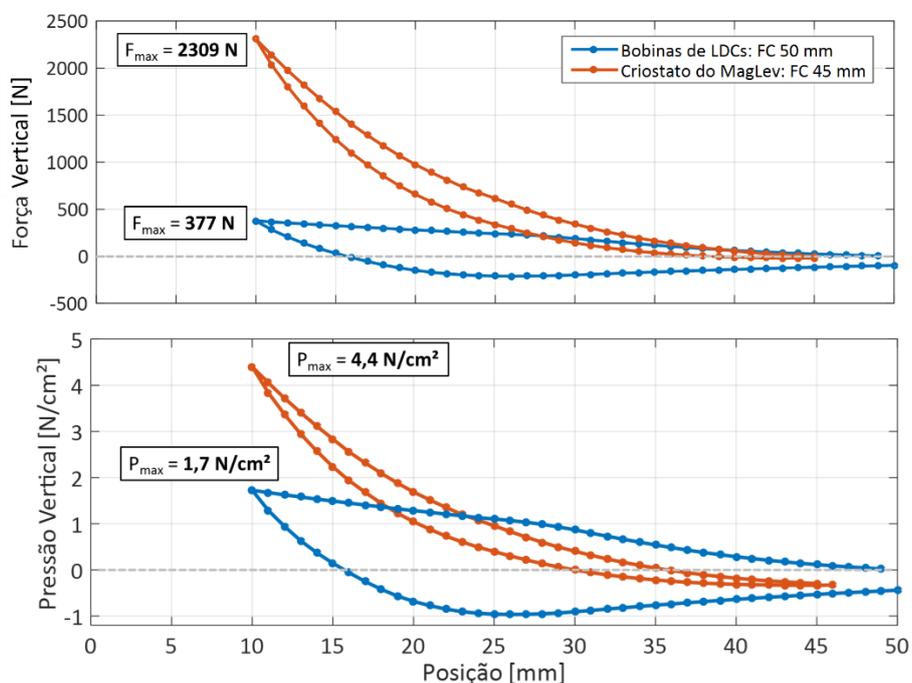


Figura 5.28. Comparação entre o par de bobinas e o criostato original.

5.5.3 Testes Dinâmicos de Decaimento de Força

Nos testes de 7 a 10, é feito o FC a 50 mm e o par de bobinas é deslocado em passos de 1 mm até diferentes alturas mínimas (variando de 10 mm a 25 mm). Quando atingida a altura mínima, ela é mantida por 10 minutos em medição estática, sendo possível assim observar o decaimento da força devido ao *flux creep*. Os resultados são mostrados na Figura 5.29. Este teste é importante para uma aplicação de mancal magnético pois permite avaliar o decaimento da força no tempo, que tem um comportamento assintótico. Enquanto os testes 1 a 6 são uma análise estática que dão uma ideia da máxima força atingível, a medição do *flux creep* permite uma análise mais realista do comportamento esperado em operação. Observa-se que o decaimento devido ao *creep* independe da altura mínima, sendo de cerca de 36% em todos os casos. A perda de 1/3 da força de levitação em somente 10 minutos é problemática para a aplicação em questão e provavelmente seja outra consequência da penetração de campo magnético nos filmes finos supercondutores. É esperado que o aumento da quantidade de fitas empilhadas reduza esta perda.

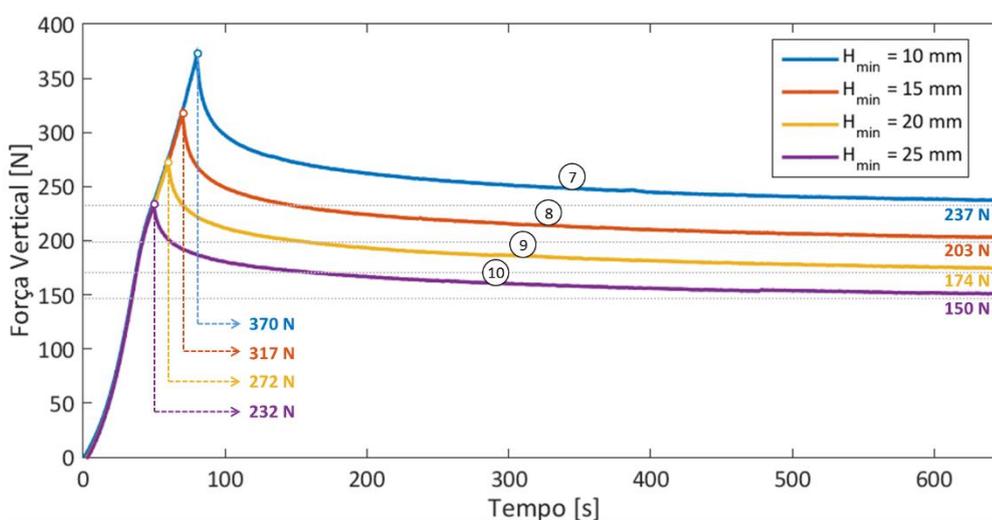


Figura 5.29. Resultados dos testes de *flux creep* (7 a 10).

Os testes 11 a 14 são uma análise mais abrangente do comportamento dinâmico da força no tempo, chamado de *flux pump*. Ele consiste em executar uma variação cíclica de campo magnético sobre o supercondutor de forma a estressar a rede de vórtices, causando decaimento na força. Após feito o FC a 50 mm, o par de bobinas é deslocado em passos de 1 mm até diferentes alturas mínimas (variando de 10 mm a 25 mm). Ao chegar à altura mínima, são executados 10 ciclos de variação de 2 mm na altura para observar o efeito da ciclagem no decaimento da força. Em seguida, a altura

mínima é mantida por 10 minutos para medição de *flux creep*. Esse ensaio é ainda mais próximo do real comportamento do mancal supercondutor, sujeito às dinâmicas do veículo, que o de *flux creep* estático. A Figura 5.30 mostra os resultados destes testes. Nela foram mantidos os resultados anteriores (testes 7 a 10) em linhas tracejadas para referência. Observa-se que o bombeamento de fluxo não causou muitas alterações nos decaimentos de força estática, e que os resultados praticamente convergiram para as mesmas forças ao final dos 10 minutos de medição. As variações percentuais nas forças em cada caso (a base em cada um é a força à altura mínima antes do *flux pump*) diminuem conforme a altura mínima aumenta. Isso faz sentido porque, quanto mais distante do trilho, menor é o gradiente do campo magnético sobre o campo aprisionado.

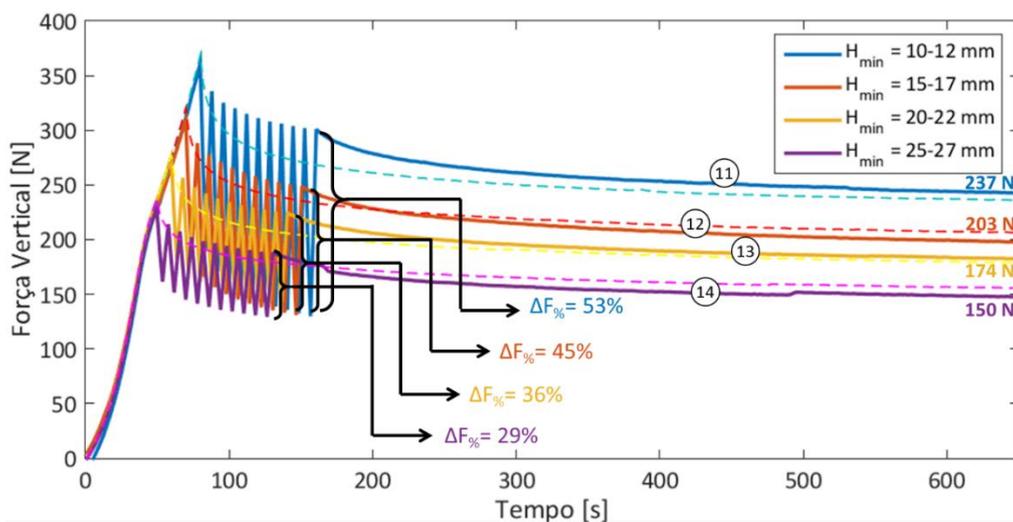


Figura 5.30. Resultados dos testes de *flux pump* com *creep* (11 a 14).

Agora, serão comparados os resultados de *creep* e *pump* das bobinas e do criostato do MagLev Cobra. No criostato, esse teste foi feito com FC a 45 mm, deslocamento até 15 mm, 5 ciclos de 2 mm de amplitude e mantido em medição estática por 10 minutos. Para as bobinas, foi utilizado o teste número 12. Os resultados, mostrados na Figura 5.31, foram normalizados em função da força a 15 mm de altura nos dois casos. Observa-se que, em termos relativos, os comportamentos em ambos não são muito diferentes. As variações percentuais da força durante as oscilações são próximas. O que se observa é que o decaimento estático ao longo dos 10 minutos é maior para as bobinas do que para o criostato. O campo magnético externo consegue alterar a condição de campo aprisionado mais facilmente. O que não difere muito do observado anteriormente, com relação à penetração de campo magnético nas fitas 2G. Esse é mais um efeito que poderá ser melhorado com o aumento do número de laços.

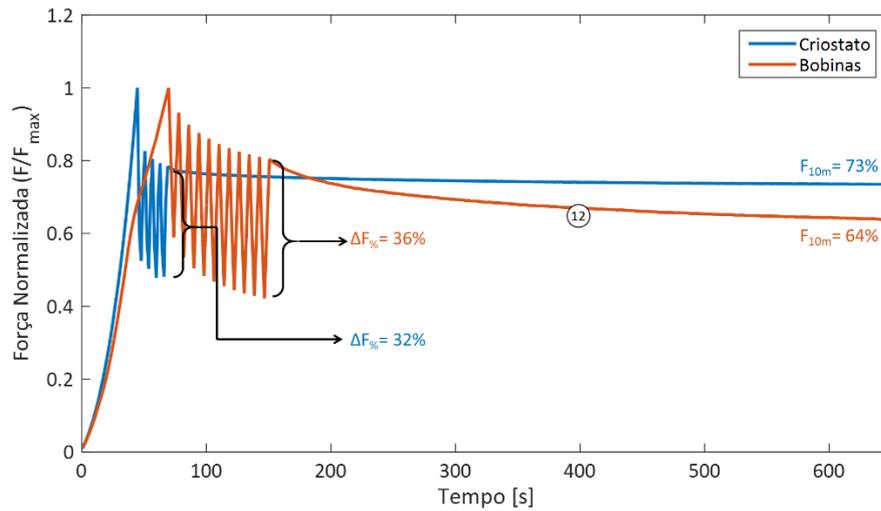


Figura 5.31. Comparação entre testes de *creep* e *pump* no criostato e nas bobinas.

5.5.4 Testes de Força com as Bobinas Perpendiculares ao Trilho

Os testes **15** a **17** são uma configuração não-convencional que foi testada a título de curiosidade. Neles, as bobinas são orientadas perpendicularmente em relação ao plano do trilho e centralizadas em relação aos polos concentradores de fluxo, conforme mostrado na Figura 5.32. Nessa configuração, o fluxo enlaçado é o devido ao campo paralelo ao trilho, mais intenso na parte central, entre os concentradores.



Figura 5.32. Posicionamento das bobinas em relação ao trilho de ímãs permanentes para os testes de força números 15 a 17.

A seguir, os resultados são mostrados na Figura 5.33. A movimentação do ensaio número **15** é equivalente à do número **2**, a do número **16** é equivalente à do número **3** e a do número **17** é equivalente à do número **7**. Não houve simulação desta configuração para comparar com estes testes e, evidentemente, também não faz sentido compará-los ao criostato. Os testes equivalentes do par de bobinas paralelas ao trilho são mostrados em linhas tracejadas para fins de comparação. Observa-se que essa configuração só é capaz de fornecer cerca de metade da força da anterior. Isso é porque existe uma diferença de altura em relação ao trilho de 60 mm entre os feixes de Fita 2G, então pode-se dizer que somente metade da bobina está efetivamente produzindo força. Além disso a curva possui uma transição de comportamento mais suave. No teste de *creep*, foi observado que as duas orientações possuem o mesmo comportamento, com a mesma taxa de decaimento. Embora essa configuração não tenha mostrado resultados melhores, deve-se levar em consideração que as bobinas não foram projetadas para esse arranjo. Porém estes não são resultados desprezíveis. Essa configuração poderia ser melhor estudada em trabalhos futuros. É possível que, por exemplo, com uma abertura interna mais estreita se consiga mais força com a orientação perpendicular. Isso abre margem para combinações de bobinas em diferentes geometrias e orientações em um mesmo criostato, a fim de se conseguir aumentar suas capacidades.

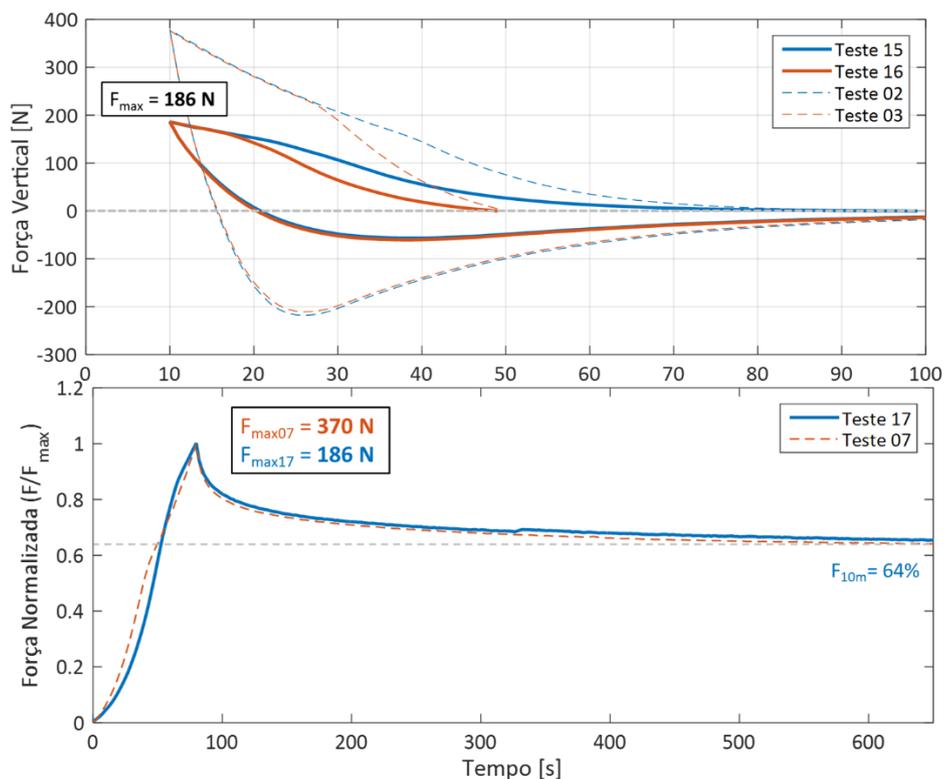


Figura 5.33. Resultados dos testes 15 a 17 do par de bobinas perpendiculares ao trilho.

5.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados da tese:

- A prova de conceito, feita com um par de bobinas de três laços cada;
- O desenvolvimento de uma estratégia de simulação com a qual seja possível projetar bobinas de LDCs variando-se alguns de seus parâmetros de projeto;
- Resultados das simulações com considerações sobre possíveis formas de se otimizar a relação força/consumo de Fita 2G;
- Apresentação de um procedimento para fabricação artesanal de bobinas de LDCs;
- Testes de força de levitação dos primeiros protótipos, um par de bobinas de 25 LDCs cada, fabricadas para aplicações de levitação magnética.

Com relação a estes resultados, dois trabalhos já foram publicados em revistas científicas indexadas.

A técnica de simulação utilizada para os LDCs foi primeiramente testada com sucesso para uma bobina tipo *racetrack*, que tradicionalmente requer uma simulação 3D devido a sua geometria. Ela foi modelada como a superposição de duas simulações 2D independentes, em que a densidade de corrente (com dependência anisotrópica de campo magnético) em cada espira é calculada por equações integrais. Este trabalho foi publicado na revista *Superconductor Science and Technology* em 2017 [80].

A ideia original das bobinas de LDCs aplicadas a levitação magnética, juntamente com os primeiros resultados dos testes de força vertical foram apresentados oralmente na *13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2017)* e publicados na revista *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* em 2018 [81].

A seguir, será feita uma conclusão para a tese, abordando as principais conquistas deste trabalho e as propostas para sua continuidade.

6 Conclusões

Nesse capítulo são apresentadas as principais conquistas e contribuições desta tese e propostas de trabalhos futuros para a continuidade dessa linha de pesquisa.

A originalidade desta tese está na proposta de utilizar laços de fitas supercondutoras para a construção de bobinas de correntes persistentes. Junto com ela vem o objetivo de se propor uma nova técnica de levitação magnética utilizando estas bobinas, motivado pela necessidade de aprimorar o domínio da técnica de levitação utilizada no projeto MagLev Cobra.

O trabalho também contribui com um modelo de simulação utilizando equações integrais para calcular a densidade de corrente induzida no tempo. Leva-se em consideração a dependência anisotrópica da densidade de corrente crítica com o campo magnético, que é necessário para a correta representação do comportamento dinâmico destas bobinas. Além disso, a técnica de equações integrais representa a geometria da fita de forma mais verossímil, permitindo a observação de comportamentos característicos de filmes finos supercondutores que não são observáveis em simulações que utilizam técnicas de homogeneização, mais utilizadas na bibliografia atual para modelagem de cabos e bobinas ativas. Este modelo, no entanto, precisa ser melhorado. Em uma análise qualitativa, observaram-se comportamentos similares na prática e nas simulações, como por exemplo, uma grande histerese na força em função da altura e uma mudança de tendência na curva de força durante a aproximação ao trilho de ímãs permanentes. Do ponto de vista quantitativo, as primeiras simulações previram uma força máxima 20% menor que o medido, porém não reproduziram a forma da curva de força. Simulações ajustadas foram capazes de reproduzir quase perfeitamente o formato da curva medida, mas com um erro de 45% para menos. Este erro, no entanto, se aplica a toda a curva, não somente ao ponto de força máxima, indicando que o modelo está coerente, mas precisa de ajustes.

Uma técnica de projeto e construção para estas bobinas foi proposta e validada através da fabricação dos primeiros protótipos. O sucesso pode ser verificado pelo fato de as bobinas não terem degradado durante os testes. Buscou-se o uso de materiais e técnicas de baixo custo e disponíveis no mercado nacional. Estima-se não mais do que R\$ 500,00 por bobina em material para a montagem e impregnação. Considerando o custo de US\$ 100,00 por metro de Fita 2G e um fator de conversão de

4 R\$/US\$, cada bobina custou cerca de R\$ 4500,00 em supercondutor. Portanto, o custo de material para montagem e impregnação é da ordem de 10% do total. Este processo de fabricação, no entanto, precisa ser melhorado. É preciso continuar a busca por melhores materiais e métodos de construção a fim de evitar qualquer tipo de degradação durante o processo e a longo prazo. Além disso, é preciso garantir que as fitas supercondutoras fiquem protegidas e bem consolidadas no interior da impregnação. A compatibilidade entre os materiais e as aplicações deve ser prioritária nessa busca.

Nessa tese não foi possível fazer qualquer levantamento sobre a força de estabilidade lateral das bobinas devido a limitações técnicas do sistema de medição. No futuro, quando a parte de movimentação horizontal for reativada, uma série de testes deve ser feita para analisar esse aspecto, que também é fundamental para o uso em questão.

A partir dos resultados, pode-se concluir que se obteve êxito no objetivo original. As bobinas de LDCs podem ser utilizadas para a levitação magnética, visto que um pequeno protótipo com apenas 25 laços foi capaz de fornecer uma pressão de levitação de 38% da do criostato de blocos maciços de YBCO. Há disponibilidade de espaço para pelo menos quadruplicar a quantidade de laços no espaço do criostato atual, portanto, será possível superar a força de levitação do sistema atual mantendo-se as dimensões originais.

6.1 Trabalhos futuros:

Nesta tese, as várias propostas feitas também levantaram incógnitas que poderão ser respondidas em trabalhos futuros. A seguir, seguem algumas sugestões.

Outras bobinas de outros formatos precisam ser testadas. Por uma questão de disponibilidade de recursos, nessa tese não foi possível explorar várias geometrias. Os resultados de simulação preveem melhoras no desempenho das bobinas com o aumento do número de laços, por exemplo, mas é preciso construir e testar diferentes variações para se ter certeza. Além disso, diferentes arranjos de bobinas podem ser testados com o objetivo de se extrair força do campo em diferentes orientações, conforme mostrado na sessão 5.5.4

Para melhorar o modelo de simulação, será necessário coletar uma bateria maior de resultados práticos, com diferentes geometrias e variações na quantidade de laços. Com um espaço amostral de dados maior, será mais fácil buscar por um conjunto de

parâmetros que forneça resultados de simulação que reproduzam medições. Pelo que foi observado, é provável que o caminho a seguir seja ajustando à sensibilidade da densidade da corrente crítica com o campo magnético. Outras representações da dependência da corrente crítica com campo magnético podem também ser estudadas.

Uma série de trabalhos podem ser desenvolvidos dando outras aplicações para este tipo de bobina. Embora a primeira proposta seja para fins de levitação, elas ainda podem ser aplicadas a, por exemplo, máquinas de histerese e mancais rotativos, ambos em desenvolvimento no Lasup.

Finalmente, um aspecto importante para aplicações mais abrangente dessas bobinas será a capacidade de controlar a corrente induzida por meio de injeção pulsada de fluxo magnético, que também está em desenvolvimento.

Com isso, a tese é finalizada, tendo contribuído para a supercondutividade aplicada com a proposta das bobinas de laços duplos cruzados de fitas supercondutoras.

Referências Bibliográficas

- [1] Onnes, H. K. "The liquefaction of helium", Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Proceedings Series B Physical Sciences, v. 11, pp. 168-185, 1908.
- [2] Onnes, H. K., "*The Superconductivity of Mercury*", Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 120 b, 122 b, 124 e, 1911.
- [3] Meissner, W., Ochsenfeld, R., "*Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit*", Die Naturwissenschaften, v. 21, pp. 787-788, 1933.
- [4] Lide, D. R., "*CRC Handbook of Chemistry and Physics*", 84^a edição, 2002.
- [5] Pobell, F., "*Matter and Methods at Low Temperatures*", 2^a edição, 1996.
- [6] Debessai, M., *et al.* "*Journal of Physics: Conference Series*", n. 215, p. 012034, 2010
- [7] London, F., London, H. "*The electromagnetic equations of the supraconductor*", Proceedings of the Royal Society of London. Series A Mathematical and Physical Sciences, v. 149, n. 866, pp. 71-88, 1935.
- [8] Ginzburg, V. L., Landau, L. D. "*On the theory of superconductivity*", Soviet Physics (Journal of Experimental and Theoretical Physics), pp. 1064-1082, 1950.
- [9] Bardeen, J., Cooper, L. N., Schrieffer, J. R. "*Theory of Superconductivity*", Physical Review, v. 108, n. 5, pp. 1175-1204, 1957.
- [10] Martini, L., "*Roadmap of Superconductivity*", Superconductivity in Energy Technology Applications 2010, Tampere, Finland, 2010.
- [11] Tinkham, M., "*Introduction to Superconductivity*", 2^a edição, Nova Iorque, McGrawhill Science / Engineering / Math, 1995.
- [12] Saxena, A. K., "*High-Temperature Superconductors*" 2^a edição., Heidelberg Dordrecht London New York, Springer, 2012.
- [13] Fossheim, K., Sudbo, A. "*Superconductivity - Physics and Applications*", v. 1, 1^a ed. West Sussex, JohnWiley and Sons Ltd., 2004.
- [14] Shi, D., "*High-Temperature Superconducting Materials Science and Engineering: New Concepts and Technology*", Pergamon, 1995.
- [15] Sutherland, P. E. "*Analytical Model of Superconducting to Normal Transition of Bulk High T_c Superconductor BSCCO-2212*", IEEE Trans. Appl. Supercond., v. 16, n. 1, pp. 43-48, 2006.
- [16] Elschner, S., Breuer, F., Wolf, A., *et al.* "*Characterization of BSCCO 2212 Bulk Material for Resistive Current Limiters*", IEEE Trans. Appl. Supercond., v. 11, n. 1, pp. 2507-2510, 2001.

- [17] de Souza, W. T. B., “*Transient Simulations Of Superconducting Fault Current Limiters*”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [18] Rettelbach, T., Schmitz, G. J. “*3D Simulation of Temperature, Electric Field and Current Density Evolution in Superconducting Components*”, *Supercond. Sci. Technol.*, v. 16, n. 5, pp. 645–653, 2003.
- [19] Grilli, F., Sirois, F., Zermeño, V., Vojenciak, M., “*Self-Consistent Modeling of the I_c of HTS Devices: How Accurate Models Really Need to Be?*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 24, n. 6, p. 8000508, 2014
- [20] Kasal, R., de Andrade Jr., R., Sotelo, G. G., Ferreira, A. C., “*Simulation of Dynamic Levitation Force Taking Flux Creep Into Account*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 2158, 2007
- [21] Sass, F., “*Modelagem do Comportamento de Mancais Magnéticos Utilizando Fitas e Blocos Maciços Supercondutores*”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2014
- [22] Atov, V. A., *et al.*, “*Optimization of Three- and Single-Phase AC HTS Cables Design by Numerical Simulation*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 4801606, 2017.
- [23] Masuda, T. *at al.*, “*Safety and Reliability of 66-kV Class HTS Cable Systems in Short-Circuit Current Accidents-Experimental Results on 40-m Cable System*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 5401504, 2017.
- [24] Xu, Y., Maki, N., Izumi, M., “*Optimization Study of Machine Parameters for 10-MW Salient-Pole Wind Turbine HTS Generators*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 23, n. 6, p. 5203405, 2016.
- [25] Bailey, W., *et al.* “*Locked Rotor and Transient Tests of a 100 kW HTS Machine*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 5203505, 2017.
- [26] Wang, Y., *et al.*, “*Fabrication and Experiment of Racetrack HTS Magnet for Stator Field-Excitation HTS Machine*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 5201605, 2017.
- [27] de Souza, W. T. B., *et al.*, “*Simulation of a Superconducting Fault Current Limiter: A Case Study in the Brazilian Power System With Possible Recovery Under Load*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 26, n. 2, p. 5600508, 2016.
- [28] Lee, S. R., *et al.*, “*Protection Scheme of a 154-kV SFCL Test Transmission Line at the KEPCO Power Testing Center*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 5401305, 2017.
- [29] Angeli, G., *et al.*, “*Development of Superconducting Devices for Power Grids in Italy: Update About the SFCL Project and Launching of the Research Activity on HTS Cables*”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, p. 5600406, 2017.
- [30] Nakasaki, H., *et al.*, “*Progress of 2G HTS Wire Development at SuperPower*”, *Applied Superconductivity Conference, ASC 2016, Denver, EUA.*

- [31] Chepikov, V., *et al.*, “Pinning Properties of PLD-Obtained GdBa₂Cu₃O_{7-x} Coated Conductors Doped With BaSnO₃”, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, v. 27, n. 4, p. 8000905, 2017.
- [32] Rostila, L., *et al.*, “How to determine critical current density in YBCO tapes from voltage–current measurements at low magnetic fields”, Superconductor Science and Technology, v. 20, n. 12, p. 1097, 2007.
- [33] Pardo, E., *et al.*, “Low magnetic-field dependence and anisotropy of the critical current density in coated conductors”, Superconductor Science and Technology, v. 24, n. 6, p. 65007, 2011.
- [34] Zhang, M., *et al.*, “Experimental and numerical study of a YBCO pancake coil with a magnetic substrate” Superconductor Science and Technology, v. 25, n. 12, p. 125020, 2012.
- [35] Gomory, F., *et al.*, “AC loss in pancake coil made from 12 mm wide REBCO tape”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 23, n. 2, p. 5900406, 2013.
- [36] Zermeño, V., *et al.*, “A parameter-free method to extract the superconductor’s $J_c(B, \theta)$ field-dependence from in-field current–voltage characteristics of high temperature superconductor tapes”, Superconductor Science and Technology, v. 30, n. 3, p. 034001, 2017.
- [37] Stephan, R. M., *et al.* “Mancais Magnéticos: Mecatrônica sem Atrito”, Editora Ciência Moderna Ltda., 2013.
- [38] Web site da Magnetic Bearings, disponível em: <http://www.magneticbearings.org/publications/> (acessado em 26 de Abril de 2017).
- [39] Kustler, G., “Extraordinary Levitation Height in a Weight Compensated Diamagnetic Levitation System with Permanent Magnets”, IEEE Transactions On Magnetics, v. 48, n. 6, p. 5900406, 2012.
- [40] Sotelo, G. G., *et al.*, “Tests with a hybrid bearing for a flywheel energy storage system”, Superconductor Science and Technology, v. 29, n. 9, p. 095016, 2016.
- [41] Xia, Z., *et al.*, “Design of Superconducting Magnetic Bearings with High Levitating Force for Flywheel Energy Storage Systems”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 5, n. 2, p. 622, 1995.
- [42] Rastogi, A., *et al.*, “Axial and Journal Bearings for Superconducting Flywheel Systems”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 13, n. 2, p. 2267, 2003.
- [43] Han, Y., *et al.*, “Design and Characteristics of a Superconductor Bearing”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 15, n. 2, p. 2249, 2005.
- [44] Flogel-Delor, U., *et al.*, “Fabrication of HTS Bearings With Ton Load Performance”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 17, n. 2, p. 2142, 2007.
- [45] Werfel, F. N., *et al.*, “Superconductor bearings, flywheels and transportation”, Superconductor Science and Technology, v. 25, n. 1, p. 014007, 2012.

[46] Mitsuda, H., *et al.*, “Improvement of Energy Storage Flywheel System With SMB and PMB and Its Performances”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, p. 2091, 2009.

[47] Strasik, M., *et al.*, “An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings”, Superconductor Science and Technology, v. 23, n. 3, p. 034021, 2010.

[48] Sotelo, G. G., de Andrade Junior, R., Ferreira, A. C., “Magnetic Bearing Sets for a Flywheel System”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 17, n. 2, p. 2150, 2007.

[49] Sotelo, G. G., de Andrade Junior, R., Ferreira, A. C., “Test and Simulation of Superconducting Magnetic Bearings”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, p. 2083, 2009.

[50] Ogata, M., *et al.*, “Test equipment for a flywheel energy storage system using a magnetic bearing composed of superconducting coils and superconducting bulks”, Superconductor Science and Technology, v. 29, n. 5, p. 054002, 2016.

[51] Mukoyama, S., *et al.*, “Development of Superconducting Magnetic Bearing for 300 kW Flywheel Energy Storage System”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 27, n. 4, p. 3600804, 2017.

[52] Stephan, R. M., de Andrade, R., Ferreira, A. C., Sotelo, G. G., “Superconducting Levitation Applied To Urban Transportation”, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, pp. 1–18, 2017.

[53] Web site da Shanghai MagLev Transportation Development Co. Ltd., disponível em: <http://www.smtdc.com> (acessado em 16 de Agosto de 2016).

[54] Web site da Railway Technical Research Institute web site, disponível em: <http://www.rtri.or.jp> (acessado em 16 de Agosto de 2016).

[55] Schultz, L., *et al.*, “Superconductively levitated transport system - the SupraTrans project”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 15, n. 2, pp. 2301 - 2305, 2005.

[56] Wang, S., *et al.*, “The man-loading high-temperature superconducting Maglev test vehicle”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 13, n. 2, pp. 2134 - 2137, 2003.

[57] Sotelo, G. G., *et al.*, “Tests With One Module of the Brazilian Maglev-Cobra Vehicle”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 23, n. 3, p. 3601204, 2013.

[58] Mattos, L. S., *et al.*, “MagLev-Cobra Operational Tests”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 3, p. 3600704, 2016.

[59] Stephan, R. M. *et al.*, “A superconducting levitation vehicle prototype”, Physica C: Superconductivity, v. 408, pp. 932 – 934, 2004.

[60] Motta, E. S., “*Otimização de Trilho Magnético de um Sistema de Levitação Supercondutora para Veículo Maglev*”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

[61] de Sousa, W. T. B., Stephan, R. M., Costa, F. S., Rodriguez, E. F., **Martins, F. G. R.**, Oliveira, R. A. H., de Andrade Jr., R., “*Projeto MagLev Cobra - Levitação Supercondutora para Transporte Urbano*”, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 38, n. 4, e4308, 2016.

[62] Dias, D. H. N., *et al.*, “*Simulations and Tests of Superconducting Linear Bearings for a MAGLEV Prototype*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, pp. 2120 - 2123, 2009.

[63] Sass, F., *et al.*, “*Superconducting Levitation Using Coated Conductors*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 23, n. 3, p. 3600905, 2013.

[64] Patel, A., *et al.*, “*Magnetic levitation using high temperature superconducting pancake coils as composite bulk cylinders*”, Superconductor Science and Technology, v. 28, n. 11, p. 115007, 2015.

[65] Osipov, M., *et al.*, “*Investigation of HTS Tape Stacks for Levitation Applications*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 4, p. 3601704, 2016.

[66] Abin, D., *et al.*, “*Relaxation of Levitation Force of a Stack of HTS Tapes*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 3, p. 8800504, 2016.

[67] Patel, A., *et al.*, “*Magnetic Levitation Between a Slab of Soldered HTS Tape and a Cylindrical Permanent Magnet*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 3, p. 3601305, 2016.

[68] Patel, A., *et al.*, “*Magnetic levitation using a stack of high temperature superconducting tape annuli*”, Superconductor Science and Technology, v. 30, n. 2, p. 024007, 2017.

[69] Sass, F., *et al.*, “*Persistent currents in a magnetic bearing with coated conductors*”, Journal of Applied Physics, v. 18, p. 203901, 2015.

[70] Barusco, P., “*Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G na Presença de Campos Magnéticos com Diferentes Ângulos de Incidência*”, Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2016.

[71] Sass, F., *et al.*, “*H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS bulks and stacks of 2G coated conductors*”, Superconductor Science and Technology, v. 28, n. 12, p. 125012, 2015.

[72] Morandi, A., “*2D electromagnetic modelling of superconductors*”, Superconductor Science and Technology, v. 25, n. 10, p. 104003, 2012.

[73] Brambilla, R., *et al.*, “*Integral equations for the current density in thin conductors and their solution by the finite-element method*”, Superconductor Science and Technology, v. 21, n. 10, p. 105008, 2008.

[74] Sirois F, Grilli F, “*Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices*”, Superconductor Science and Technology, v. 28, n. 4, p. 043002, 2015.

[75] Brambilla R, Grilli F, Martini L, “*Development of an edge-element model for AC loss computation of high-temperature superconductors*”, Superconductor Science and Technology, v. 20, pp. 16–24, 2007.

[76] Zermeño V, *et al.*, “*Towards Faster FEM Simulation of Thin Film Superconductors: A Multiscale Approach*”, Superconductor Science and Technology, v. 21, n. 3, p. 3273, 2011.

[77] Zermeño, V., “*Calculation of alternating current losses in stacks and coils made of second generation high temperature superconducting tapes for large scale applications*”, Journal of Applied Physics, v. 114, n. 17, p. 4827375, 2013.

[78] Zermeño V, Grilli F, “*3D modeling and simulation of 2G HTS stacks and coils*”, Superconductor Science and Technology, v. 27, n. 4, p. 044025, 2014.

[79] Telles, G. T., “*Sistema de Medidas de Força para Mancais Magnéticos Supercondutores*”, Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2015.

[80] **Martins, F. G. R.**, Sass, F. Barusco, P., Ferreira, A. C., de Andrade Jr., R., “*Using the integral equations method to model a 2G racetrack coil with anisotropic critical current dependence*”, Superconductor Science and Technology, v. 30, n. 11, p. 15009, 2017.

[81] **Martins, F. G. R.**, Sass, F., Ferreira, A. C., de Andrade Jr., R., “*A Novel Magnetic Bearing Using REBCO Double Crossed Loop Coils*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 28, n. 4, p. 6602405, 2018.

Apêndice

Evolução do Processo de Fabricação das Bobinas

A construção das bobinas descrita na sessão 5.3 é apenas o resultado final de uma série de tentativas que deram errado. Apesar de não estarem descritas no corpo principal do texto, essas etapas fizeram parte do processo de desenvolvimento e merecem a documentação, até para que, com a continuação desse trabalho, erros passados não sejam cometidos.

Quanto ao procedimento de corte, a primeira técnica desenvolvida foi utilizando um gabarito em G10. Ele consistia de uma chapa de 0,5 mm de espessura com um sulco no centro. A fita 2G era centralizada com esse sulco e presa ao gabarito com fita adesiva. Em seguida, era virado para baixo, de forma que a fita ficasse pressionada entre o gabarito e a mesa. Um estilete era então passado pelo sulco várias vezes até cotar a fita. A Figura A.1 mostra o gabarito. Esse método era problemático porque acontecia de a fita adesiva descolar durante o procedimento por causa da força aplicada ao corte, o alinhamento não era garantido e o corte ficava torto, muita força precisava ser feita sobre a fita e o corte causava uma degradação visível. Na hora de retirar a fita adesiva da fita 2G às vezes ocorria delaminação (o adesivo arrancava a camada de prata). Além disso, era um método inseguro e sujeito a acidente em caso de a lâmina resvalar. A implementação da estação de corte com a guia linear foi uma solução simples e eficaz, resolvendo de forma quase total esses problemas.

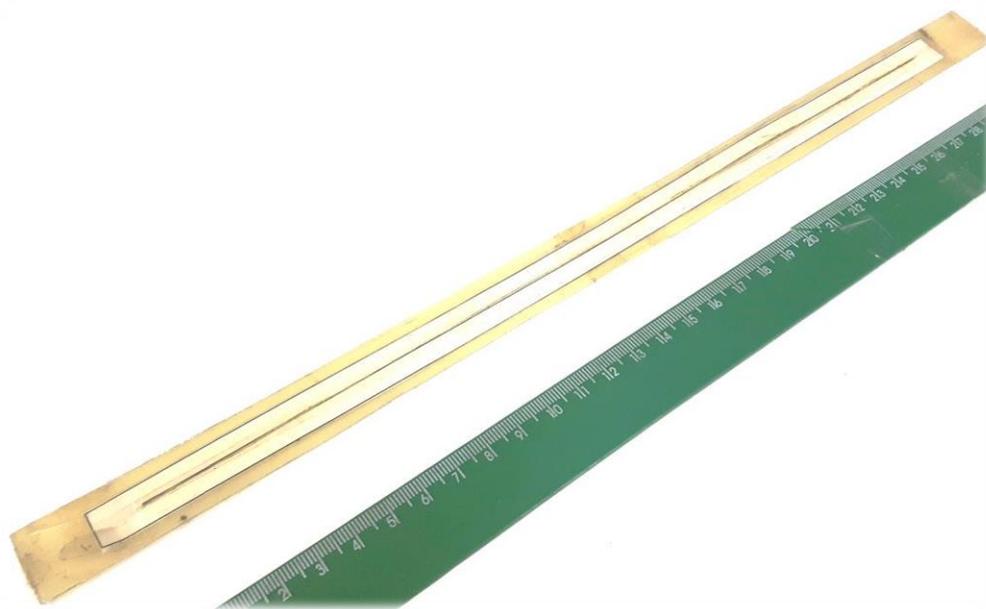


Figura A.1. Gabarito de corte em G10 de 0,5 mm de espessura.

Houve uma tentativa de se iniciar uma parceria com outro grupo de pesquisa da COPPE que dispunha de uma cortadora a laser de alta precisão para começar a desenvolver uma técnica de corte das Fitas 2G que degradasse o mínimo possível a camada supercondutora. Não houve resultado documentado, mas com os primeiros testes foi possível ajustar a potência e velocidade do laser para cortar a fita causando um dano relativamente pequeno (segundo análise comparativa com microscópio). No entanto, esse trabalho foi abandonado porque o aluno que o desenvolveria foi fazer pós-graduação fora do país. Ainda assim, sabe-se que é possível e a ideia permanece para, no futuro, havendo oportunidade, ser retomada.

O procedimento de amarrar os laços inicialmente foi feito somente com fita de teflon (para vedação de encanamento). Ela é elástica e tem boa aderência, mas era necessário garantir que o pacote ficasse centralizado no molde, sem encostar-se às laterais. Do contrário o metal de Wood não conseguia recobrir completamente e partes dele ficavam expostas. Vários pequenos segmentos de fio de cobre esmaltado eram inseridos dentro do molde para atuar como espaçadores entre o pacote envolto em teflon e a parede do molde. Esse processo era muito demorado e nem sempre efetivo. Mesmo assim partes das fitas ficavam expostas. Foram feitos testes com outros materiais para a amarra:

- Fio de nylon: a amarra não ficava firme, o fio deslizava e afrouxava;
- Linha de costura: os laços atuavam como lâminas e cortavam a linha;
- Fio de lã: é bom para tencionar e firmar os laços sem risco de amassá-los, mas piorou a entrada e acomodação do metal no molde;
- Bandagem de enrolar bobina de motor elétrico: muito larga para o tamanho do pacote, o invólucro ficou grosseiro e deu pouca firmeza nas fitas;
- Fio de cobre esmaltado de 1 mm de diâmetro (BWG 20): difícil de conformar manualmente e, por isso, não foi possível dar firmeza na amarra;
- Fio de cobre esmaltado de 0,4 mm de diâmetro (BWG 27): facilmente conformável, mas não foi um bom espaçador, partes da bobina ficaram expostas após impregnação.
- Fio de solda de Pb-Sn: Facilmente conformável, mas frágil, arrebenta com facilidade durante o processo e é difícil fazer uma amarra firme, arrebentava durante a acomodação das bobinas dentro do molde;

Há de se levar em consideração que provavelmente a amarra feita com fio de lã ou fio de solda tivessem sido mais bem-sucedidas se o molde não fosse tão estreito. Na época só havia um molde de 3 mm de espessura. Posteriormente foi que surgiu a

ideia de aumentar sua largura independentemente da quantidade de supercondutor no interior. Com um molde mais largo, é possível que a acomodação dos laços fique mais fácil e essas amarras não apresentem os mesmos problemas. Isso pode ser testado no futuro.

A produção do molde originalmente era em G10 usinado por uma fresadora com controle computadorizado (CNC). Esse processo era demorado, devido ao número de peças a serem usinadas e ao seu tamanho. Além disso, o material não é barato e isso também dificulta a fabricação de várias peças em série para diferentes testes. Dois tipos de moldes foram fabricados.

O primeiro molde, em escala menor, mostrado na Figura A.2, era montado com empilhamento de três camadas de peças, usando parafusos como guias. Ele apresentou muita complicação na montagem e no desmolde. Por exemplo, houve esmagamento do laço mais externo na montagem e fratura na ponta da bobina no desmolde. É possível observar na Figura A.2 (a) que os laços não estão amarrados. Nessa época, com protótipos de pequena escala, isso ainda não era necessário, pois os testes eram feitos com apenas 5 laços e não havia o problema com o manuseio de uma quantidade tão pequena. Isso só veio a ser implementado com os protótipos maiores.

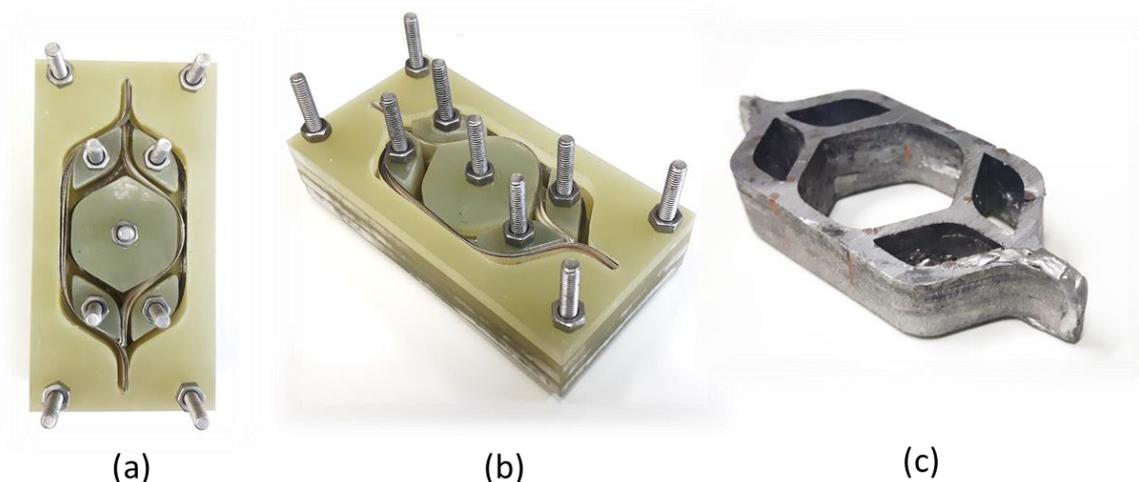


Figura A.2. Molde dos LDCs em pequena escala, feitos em G10 na CNC: vista superior (a) e isométrica (b). Bobina LDC de pequena escala feita com o primeiro molde.

A segunda versão, mostrado na Figura A.3, possui peças que facilitam o processo de montagem e desmolde. Nesse caso, as peças de G10 empilhadas são coladas antes de usinar (três placas de 5 mm coladas para formar um bloco de 15 mm de espessura), outro complicador no processo. A montagem da parede externa é feita horizontalmente e aparafusada por uma aba no centro. Um problema desse molde foi

que o metal de Wood derretido vazava por algumas frestas durante a impregnação. Ele possui muitas frestas e deveria ter mais parafusos para distribuir a pressão e garantir a vedação. Na Figura A.4 é mostrado um esquema da montagem dessa versão do molde e algumas imagens de etapas do procedimento.

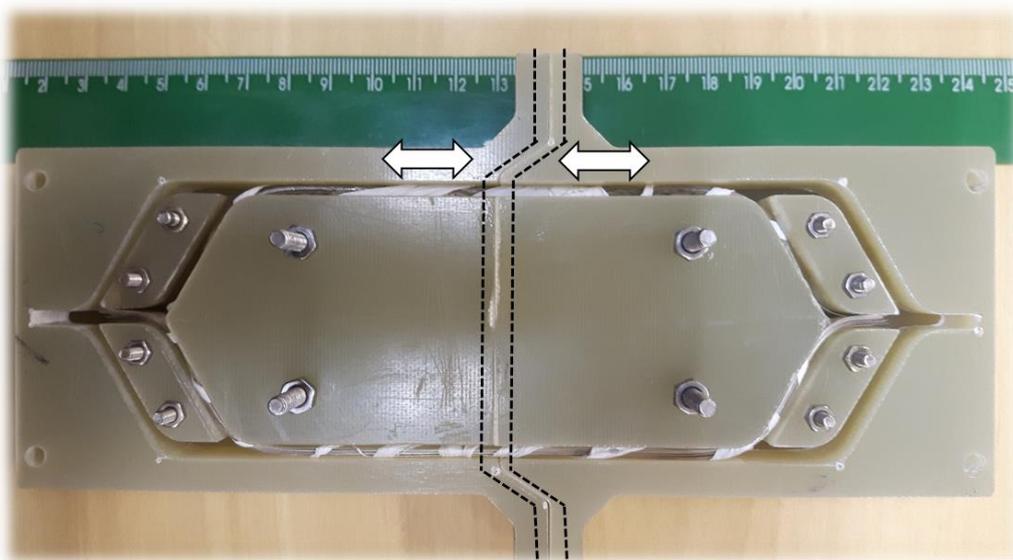


Figura A.3. Segunda versão do molde, com montagem horizontal da parede externa.

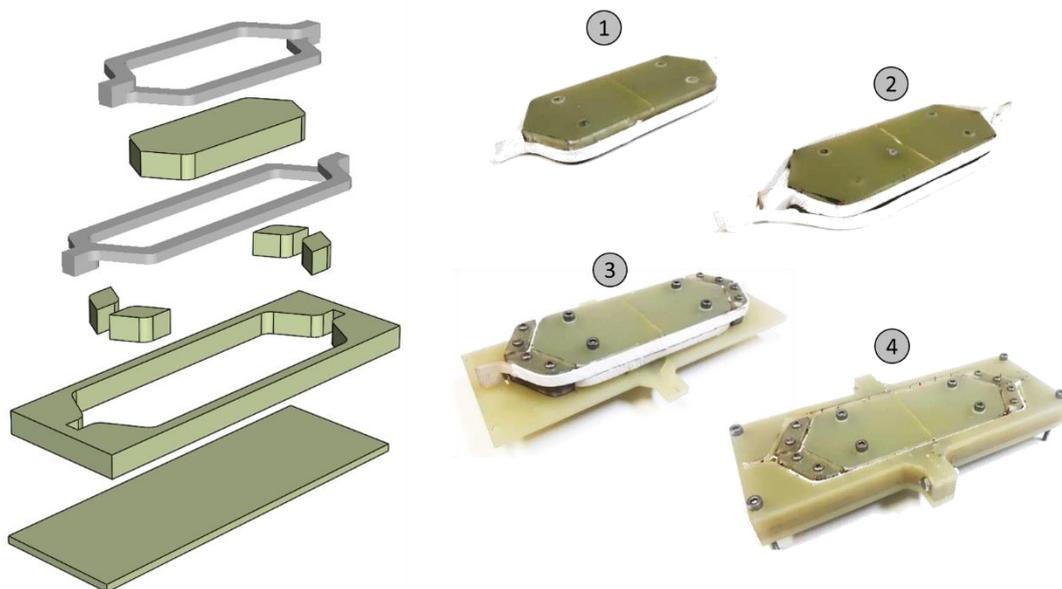


Figura A.4. Esquema da montagem da segunda versão do molde em G10.

Com relação à impregnação, o metal de Wood não foi a primeira tentativa. Quando a primeira bobina de cinco laços foi construída para a prova de conceito, após os primeiros testes ela foi impregnada com resina epóxi C5-102, fornecida pela *Oxford*

Instruments, para aplicações criogênicas. No entanto, durante os testes seguintes a resina não suportou os ciclos térmicos e se fragmentou. Como ela havia aderido às Fitas 2G, nesse momento também houve a delaminação dos laços, e o protótipo foi perdido. A Figura A.5 mostra o estado lastimável em que os laços se encontravam após o incidente. Ainda não se sabe ao certo o que possa ter acarretado isso, se um mau uso da resina, a ciclagem térmica ou o fato dela ter sido aplicada superficialmente ao invés de todo o conjunto ser resinado em um molde permanente. A terceira opção aparenta ser a mais plausível, mas não havia disponibilidade de resina o suficiente para um novo teste desse tipo e seu preço também é alto. Isso fez com que essa ideia fosse descartada.



Figura A.5. Resultado ruim do teste de impregnação com resina para aplicações criogênicas.

Os primeiros testes de metal de Wood utilizaram pequenas bobinas de laços simples de Fita 2G. O primeiro teste foi a de imergir a bobina em banho de liga e retirar em seguida. O aspecto da impregnação ficou bem grosseiro, conforme mostrado na Figura A.6 (a), além de verificado que a solda não permeou as camadas internas do laço. Noutro teste, a liga foi aplicada lentamente sobre o laço com o auxílio de um soprador de ar quente, como se fosse um processo de soldagem. Neste, o aspecto ficou bem melhor, mas ainda assim não se consegue fazer a liga permear as camadas internas do laço, também mostrado na Figura A.6 (b). A conclusão a que se chegou é que o metal de Wood não consegue molhar nem a prata nem o cobre, portanto, ela não permeia perfeitamente por entre as camadas da bobina, apenas recobre a pilha externamente. Ela é capaz, no entanto, de molhar superfícies com solda de chumbo-estanho (graças ao estanho presente na liga). Isso abre possibilidades para, no futuro, se não for encontrado outro material com melhor relação custo-benefício, utilizá-la com fitas já estanhadas de fábrica



Figura A.6. Testes de impregnação com metal de Wood: imersão em banho de metal (a) e aplicação com soprador de ar quente (b)

Outros materiais e métodos ainda podem ser testados, como por exemplo, as ligas de solda de Pb-Sn e In-Sn. É interessante investir mais tentativas com o metal de Wood graças a suas vantagens econômicas, que podem fazer diferença considerável na viabilização do mancal de LDCs proposto.

O fato de o metal de Wood não molhar a prata é a causa de um problema mencionado anteriormente: o não recobrimento de partes da bobina quando muito próximas ou encostadas à parede do molde, mostrado na Figura A.7. Esse foi um dos grandes problemas encontrados, pois motivou o desenvolvimento de uma amarra que também funcionasse como espaçador, permitindo que o pacote de laços se mantivesse no meio no molde, dando espaço para a liga se espalhar ao entorno. Quando ocorreu de partes dos laços ficarem expostos, mais liga tinha de ser adicionada com auxílio de um ferro de solda para cobrir a falha da impregnação. Esse processo é trabalhoso e não apenas não garante um recobrimento excelente, como altera um pouco a característica da bobina, deixando-a mais espessa e irregular, conforme mostrado na Figura A.8, o que também acabava dificultando a montagem para testes.

Um outro detalhe modificado foi a permanência das quatro ilhas que dão formato à cabeça da bobina. Nos primeiros protótipos, tais como na Figura A.2 (c) e Figura A.7, estas peças eram removidas no desmolde. Isso parou de ser feito porque houve um desmolde em que a cabeça da bobina se partiu no ato. Daí chegou-se à conclusão de que isso estaria causando um estresse desnecessário à estrutura. Além disso, mantê-las permanentemente na cabeça acaba sendo útil para melhorar a resistência mecânica da bobina, além de poderem ser usadas como ponto de fixação para os

testes. Desde então, as ilhas passaram a ser parte integrante da bobina. O único inconveniente é que elas devem ser fabricadas para cada bobina construída, e não fazem mais parte integrante do molde.

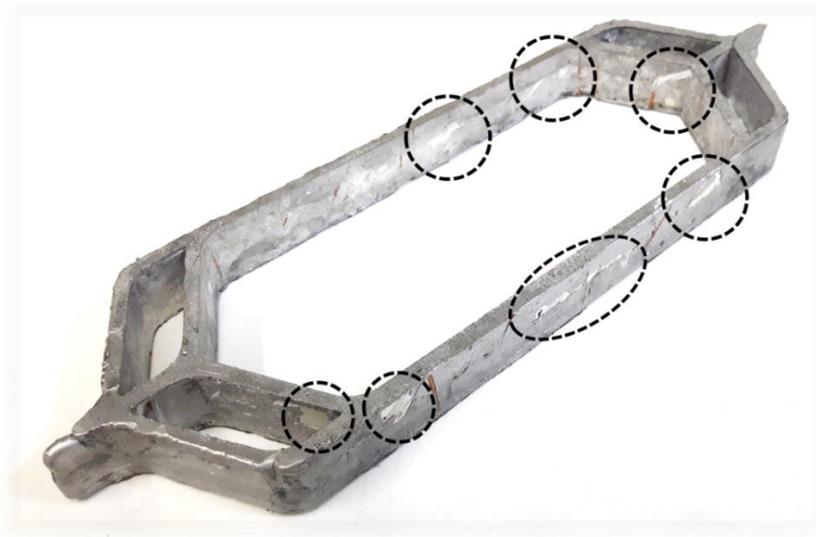


Figura A.7. Bobina LDC feita no 2º molde com destaque para algumas partes em que a impregnação ficou com falhas.



Figura A.8. Bobina LDC feita no 2º molde depois dos defeitos da impregnação serem recobertos manualmente com auxílio de um ferro de solda.

Quando estas bobinas foram testadas, foi observado um processo de degradação com o passar dos dias, conforme os ensaios foram sendo realizados. O fato de a cada dia ensaios iguais darem resultados diferentes fez com que a confiabilidade dos dados

fosse duvidosa. Estes dados foram descartados e novos protótipos foram fabricados. Uma dessas bobinas foi levada à estufa para retirar a impregnação e avaliar o estado dos laços. A Figura A.9 mostra os laços interno e externo logo após a retirada da impregnação. A primeira coisa a ser notada é que o invólucro em teflon está bastante rasgado. Isso aconteceu na montagem da bobina no molde, especialmente na inserção dos espaçadores de cobre entre as fitas e a parede do molde. Isso foi um dos fatores que levou à mudança da forma como esse espaçamento é feito e ao aumento da espessura da impregnação.



Figura A.9. Laços interno e externo de uma bobina degradada após retirar a impregnação.

Ao retirar o teflon e analisar laço por laço, mostrado na Figura A.10, é possível identificar vários pontos de delaminação nas fitas. São as regiões escuras, em que a camada supercondutora está a mostra. Quando o supercondutor entra em contato com a atmosfera, especialmente a da UFRJ, que está na beira do mar, é rapidamente degradado e perde suas propriedades. Essa delaminação pode ter sido causada pelo esforço mecânico que as fitas sofreram. Como o metal de Wood não consegue permear por entre as fitas, é bem provável que elas tenham ficado soltas dentro do invólucro metálico. Conforme foram sendo submetidas aos ensaios, as torções e contrações foram aos poucos fraturando as camadas. Para tentar diminuir isso, a ideia foi fazer a amarra com um material mais firme que o teflon, que pudesse pelo menos dar alguma firmeza aos laços dentro do molde. Ainda assim, não é uma solução totalmente efetiva. Para eliminar totalmente esse problema, as fitas deveriam ser revestidas com a impregnação uma por uma (o metal de Wood já é sabido que não tem como ser, já que ele não molha a prata nem o cobre), para depois montar os laços e então levar à estufa para que todo o metal derretesse e colasse os laços uns nos outros e com o invólucro externo.



Figura A.10. Laços da bobina degradada desmontada com vários pontos de delaminação.

Anexos

A. Ficha Técnica da borracha líquida de silicone utilizada na fabricação do molde vasado para as bobinas



BORRACHA DE SILICONE VERMELHA

A borracha de silicone vermelha é um elastômero bi-componente, vulcanizável à temperatura ambiente e que após a adição de catalisador, resulta num produto com flexibilidade limitada e alta dureza.

VANTAGENS

BOA FLUIDEZ INICIAL
EXCELENTE MOLDABILIDADE
BAIXA RETRAÇÃO LINEAR
BOA RESISTÊNCIA TÉRMICA E BOA DISSIPAÇÃO DE CALOR

APLICAÇÕES

ELÉTRICA e ELETRÔNICA	Encapsulamento de componentes
MÓVEIS	Moldagem de elementos de mobília ou decoração.
CONSTRUÇÃO CIVIL	Pré-fabricação de elementos decorativos e restauração.
BIJUTERIAS	Moldagem e reposição de peças em poliéster, acrílico, etc.
MATRIZARIA e PROTOTIPAGEM	Reprodução de moldes e matrizes industriais, incluindo metais ou ligas com baixo ponto de fusão.

Esta borracha não é recomendada quando o objetivo for isolamento elétrico.

PROPRIEDADES

Na forma de apresentação:

ASPECTO		Pasta fluida opaca
COR		Vermelha
VISCOSIDADE	Cps a 25°C	~4.000
DENSIDADE	g/cm ³ a 25°C	1,29 a 1,35

Após Vulcanizado:

DUREZA após 24 h	Shore A	50 a 60
ALONGAMENTO ATÉ RUPTURA	%	~100
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	70°C (W/km)	0,23
CONSTANTE DIELÉTRICA	25°C - 50 Hz a 5 MHz	3,5 a 3,7
RETRAÇÃO LINEAR	após 7 dias em repouso	0,8 %

B.T. BSVM - Última Revisão: 14/09/2017-Responsável Técnico-CRQ 04475466 – IV Região

Rua Anatole France, 298 – Moinho Velho – São Paulo/ SP - (11) 2066-2172



MODO DE USAR

Catálise O emprego do catalisador é absolutamente necessário para a boa utilização da borracha de silicone vermelha. A mistura de catalisador, na dosagem de 5 % (50 g de catalisador para 1 kg desta borracha), deve ser cuidadosamente homogeneizada, por meio manual ou mecânico. Lembrando que a homogeneização mecânica ou vigorosa agrega indesejavelmente muitas bolhas de ar; recomenda-se, para remoção destas bolhas geradas por efeito da mistura, a aplicação vácuo numa pressão de 10 a 30 mmHg, antes do composto iniciar o processo de vulcanização.

Condições usuais de Cura

Dosagem de catalisador, em peso	5 %
Tempo de utilização da mistura (min)	20 a 30
Tempo mínimo para desmoldagem, à temperatura ambiente	2 a 3 horas

- OBS.:**
- Para peças muito espessas (acima de 5 cm), recomenda-se aguardar 24 horas para desmoldagem.
 - Em ambientes frios ou no inverno, espera-se que os tempos ilustrados acima sejam maiores.

ESTOCAGEM E ARMAZENAMENTO

- Armazenar em local seco ao abrigo da luz solar direta.
- Após períodos de armazenamento superiores a 6 meses, a borracha de silicone Vermelha em sua forma de apresentação, poderá sofrer decantação que poderá ser reconstituída por meio de uma nova homogeneização manual ou mecânica, tornando o composto em condições adequadas de utilização.
- Informamos que este produto não é inflamável, tóxico e não consta nas listagens de produtos perigosos da Resolução ANTT 420; contudo, a borracha de silicone Vermelha não é recomendada para contato direto com alimentos, cosméticos, medicamentos e procedimentos clínicos.
- Recomendamos, também, adotar procedimentos de asseio e higiene após manipulação de qualquer produto químico antes das refeições.

B. Ficha Técnica do metal de Wood utilizada na impregnação das bobinas



BOLETIM TÉCNICO BT.012

Rev. 011

LIGA FUSÍVEL BI48

Pág. 1/2

1. Denominação Comercial : Liga fusível com bismuto

Código SOFT:

cápsula extrudada = **BI48.E40, BI48.E44 e BI48.E45**

2. Apresentação:

2.1 Dimensões:

- cápsulas:

	diâmetro	peso	comprimento
BI48.E37	Máx. 4,8 mm	3,6 a 3,8 g	Máx. 29 mm
BI48.E42	Máx. 4,8 mm	4,1 a 4,3 g	Máx. 29 mm
BI48.E43	Máx. 4,8 mm	4,2 a 4,4 g	Máx. 29 mm
BI48.E45	Máx. 4,8 mm	4,4 a 4,6 g	Máx. 29 mm

2.2 as cápsulas devem estar acondicionadas em barricas com peso líquido de 20 kg.

3. Identificação:

As embalagens (caixas ou barricas) devem apresentar uma etiqueta externa com as seguintes informações: **nome do produto; número de lote; data de fabricação; data de validade; peso líquido; razão social, endereço e CNPJ do fabricante.**

4. Características Específicas:

4.1 Característica química da Liga:

	%	Método Soft
Sn (Estanho)	12,0 + ou - 1	MA 005
Pb (Chumbo)	Diferença (34,0 + ou -1)	MA 006
Bi (Bismuto)	48,0 + ou - 1	MA 002
Cd (Cádmio)	6,0 + ou - 1	MA 006
Outros	máximo 0,5%	MA 014

4.2 Propriedades Físicas:

4.2.1 temperatura de amolecimento: 70 a 77°C - Método SOFT MA 015

4.2.2 especificamente para cápsula: peso de acordo com o especificado no item 2.1 (Método SOFT MA.010)



Soft Metais Ltda

Av. João Ferreira Penna, 281 - Distrito Industrial III - CEP 14707-002 - Bebedouro SP

Fone/fax: (17) 3344 8000 DDG 0800 1000 52

Internet: www.softmetais.com.br E-mail: gq@softmetais.com.br



5. Aplicação: na fabricação de válvulas de segurança contra incêndio para butijão de GLP ou outros gases. Também na fabricação de dispositivos de segurança contra incêndios.

6. Armazenamento / Manuseio / Validade

6.1 armazenamento:

- manter em local seco e livre de fontes de calor;
- incompatibilidade: com oxidantes;

6.2 manuseio: não requer EPI's;

6.3 validade: indeterminada;

6.4 empilhamento máximo:

- barricas: 2;

7. Precauções de Segurança: Consultar F.I.S.P.Q. 009

7.1 Não contêm substâncias cancerígenas;

7.2 não contém produtos que afetam a camada de ozônio;

7.3 Componentes Perigosos: as ligas fusíveis são compostas de metais de baixo ponto de fusão, onde se destaca a presença de chumbo e cádmio metálicos. Estes metais são nocivos ao organismo humano se entrarem em contato com a corrente sanguínea, quer através da ingestão ou da inalação de seus vapores, quando as ligas metálicas são aquecidas à temperaturas muito elevadas, acima de 500 ° C. Nas temperaturas de trabalho, que dificilmente ultrapassam 200°C, a geração de vapores é desprezível, não havendo contaminação pela inalação destes vapores;

7.4 Higiene e proteção: o chumbo e o cádmio podem ser prejudiciais se absorvidos pelo sistema digestivo. **Não deve ser permitido comer, beber, ou fumar na área de trabalho. As mãos devem ser bem lavadas com água e sabão depois de manusear a liga fusível, principalmente antes de comer ou fumar.**

8. Disposição de rejeitos: embora o produto seja estável e não reativo à temperatura ambiente, seus resíduos não devem permanecer em local aberto sujeito a intempéries, pois podem se degradar com o tempo. Devem ser armazenados em local coberto e enviados para reciclagem no fabricante.

ATENÇÃO: Este documento tem caráter informativo sobre dados técnicos que auxiliam o uso de nossos produtos. A SOFT se reserva o direito de alterá-lo sem prévio aviso. Para sua atualização, contate nosso Depto. Comercial ou Técnico para certificar-se da revisão mais recente.